



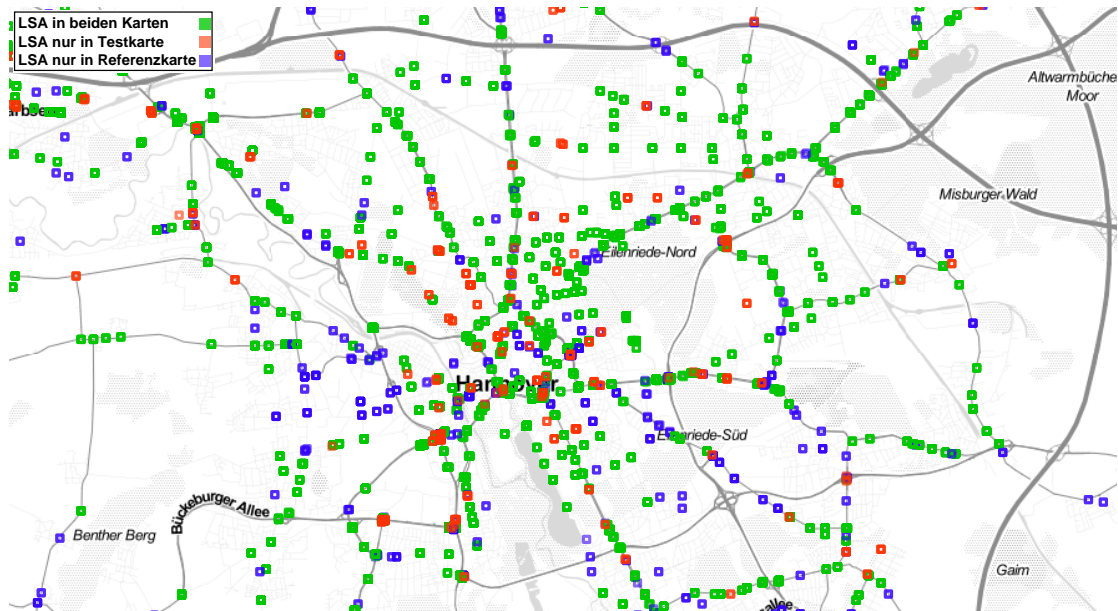
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Leibniz
Universität
Hannover

Masterarbeit

Bestimmung einer Bewertungsmetrik zum Vergleich digitaler Straßennetze für Verkehrsflusssimulation und Routing von Einsatzkräften



Robert Sämann

Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover
in Kooperation mit
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Oktober 2014

Arbeit

Masterarbeit zur Erlangung des Hochschulgrads *Master of Science* (M.Sc.)
im Studiengang *Computergestützte Ingenieurwissenschaften*

Titel

Bestimmung einer Bewertungsmetrik zum Vergleich digitaler Straßennetze für Verkehrsflusssimulation und Routing von Einsatzkräften

Titel (englisch)

Determination of a performance indicator for comparison of digital road networks for traffic simulation and rescue forces routing

bearbeitet am

Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Berlin

vorgelegt am

Institut für Bauinformatik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Autor, Matrikelnummer

Robert Sämann, 2678800

Bearbeitungszeitraum

18.04.2014 - 17.10.2014

Erstprüfer

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn (Institut für Bauinformatik)

Zweitprüferin

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester (Institut für Kartographie und Geoinformatik)

Betreuer

Dipl.-Ing. Nils Rinke (Institut für Bauinformatik)

Dipl.-Inf. Günter Kuhns (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

Dipl.-Inf. Richard Meinsen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind.

Diese Masterarbeit wurde an der Leibniz Universität am 28.11.2014 benotet.

.....
Robert Sämann

Hannover, den 28.11.2014

Abstract

Digital road networks obtained an important role in navigation applications and research. A small number of professional sources provides data with a wide range accounting for quality. When using data from different sources for a task it has to be in an equal manner to produce the same results. This work aims to establish criteria in comparison for digital road networks for the purpose of route finding and traffic simulation.

The criteria is splitted in a macroscopic, strategic view for the routing and a microscopic, tactical analysis of the data for the simulation requirements.

As sources for a testing scenario NAVTEQ data from 2010 & 2013 and OpenStreetMap 2013 & 2014 are used for comparison. The maps are examined at different loctions in Germany. The main focus lies on Brunswick in Lower Saxony. Additional analysis takes place in Hanover and Darmstadt.

For these regions the introduced tools give good results in completeness and accuracy, indicating the OpenStreetMap to be much more complex in sheer geometry information. For navigation purpose the NAVTEQ map is still better.

When selected as map for microscopic simulation the OpenStreetMap gives more realistic results.

Keywords: digital road map, comparison, quality, NAVTEQ, OpenStreetMap

Kurzfassung

Digitale Straßenkarten finden heute in vielen Bereichen Anwendung. Am weitesten verbreitet ist die persönliche Navigation für Fußgänger, Radfahrer, Kraftfahrzeuge oder Schienenverkehr. Nur wenige professionelle Anbieter erstellen dabei die digitalen Daten, deren Informationsgehalt einer hohen Varianz unterliegt.

Soll eine Anwendung mit Karten aus verschiedenen Quellen funktionieren, ist zunächst die Gleichwertigkeit der Karten in Bezug auf die relevanten Angaben festzustellen. Je nach Einsatzgebiet unterscheiden sich dabei die Anforderungen.

In dieser Arbeit werden Bewertungskriterien geschaffen, welche zur Bewertung von digitalen Straßenkarten eingesetzt werden. Sie sollen die Auswahl der Kartengrundlage vereinfachen, wenn sich diese für die Navigation oder Verkehrsflusssimulationen eignen soll. Als Anwendungsfall wird der Einsatz von zwei Karten für das Management von Einsatzkräften bei Katastrophen bewertet. Dazu zählt die Routensuche von Rettungskräften, sowie die Planung von Evakuierungsaktionen auf einer digitalen Straßenkarte.

Im Rahmen dieser Arbeit werden speziell Karten-Daten von NAVTEQ und OpenStreetMap verglichen. Als Gebiete wird hauptsächlich die Stadt Braunschweig untersucht. Für weitere Vergleiche werden außerdem die Region Hannover und Darmstadt herangezogen.

Die eingeführte Software-Metrik für digitale Straßenkarten vergleicht nicht nur die Netzlänge, sondern auch die Überlagerung der Geometrien und Straßenattribute. Dabei kommt ein eigens entwickelter Matching-Algorithmus zum Einsatz. Zudem wird eine Bewertung anhand der Ergebnisse einer Verkehrsflusssimulation durchgeführt.

Schlagworte: Digitale Straßenkarte, Bewertung, Vergleich, NAVTEQ, OpenStreetMap

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Stand der Technik	3
2.1	Einführung von Metriken	3
2.1.1	Mathematische Metrik	3
2.1.2	Software-Metrik	3
2.2	Bewertungskonzepte	4
3	Bewertungskriterien	7
3.1	Anforderungen	7
3.1.1	Routensuche	7
3.1.2	Verkehrsflusssimulation	8
3.1.3	Referenznetz	9
3.2	Genauigkeit der Positionierung	9
3.2.1	Hausdorff Abstand	9
3.2.2	Parametrisierter Abstand	11
3.2.3	Mittlerer Abstand	11
3.2.4	Manhattan Abstand	12
3.3	Vollständigkeit	13
3.3.1	Gesamtlänge der Straßennetze	13
3.3.2	Überlagerung der Straßennetze	13
3.4	Vernetzung	15
3.4.1	Straßennetz-Graph	15
3.4.2	Isomorphie	16
3.4.3	Abbiegevorschriften	17
3.5	Genauigkeit der Straßenattribute	18
3.5.1	Abbildung	18
3.5.2	Kennzahlen	19
3.5.3	Konflikte	21
3.5.4	Referenzwert	21
3.6	Bewertungsablauf	23
4	Verwendete Technologie	25
4.1	Straßenkarte NAVTEQ - HERE	25
4.1.1	Datenstruktur	25
4.1.2	Eigenschaften der Straßen	25
4.1.3	Abbiegebeziehungen	26
4.1.4	Informationen für Einsatzkräfte	27
4.2	Straßenkarte OpenStreetMap	27
4.2.1	Datenstruktur	27
4.2.2	Aktualität	28
4.2.3	Eigenschaften der Straßen	28
4.2.4	Abbiegebeziehungen	31
4.2.5	Knotenpunkte	31

4.2.6	Informationen für Einsatzkräfte	32
4.3	Datenstruktur für das Bewertungsverfahren	36
4.4	Datenkonvertierung mit NetConvert	38
4.5	Kartenversionen	42
4.5.1	Datenquelle	42
4.5.2	Datenkonvertierung	44
4.6	Kanten-Matching	44
4.6.1	Bewertung eines Matching-Verfahrens	45
4.6.2	OpenLR - Open Location Referencing	46
4.6.3	Geometrie Matching	47
5	Ergebnisse	53
5.1	Vergleich im Gebiet Braunschweig	54
5.1.1	Straßennetzlänge	54
5.1.2	Netzabdeckung	55
5.1.3	Abbiegebeziehung	57
5.1.4	Routenverteilung	59
5.1.5	Straßenattribute	64
5.2	Vergleich in der Region Hannover	65
5.2.1	Straßennetzlänge	65
5.2.2	Abbiegerelationen	66
5.2.3	Einbahnstraßen	67
5.2.4	Straßenattribute	67
5.3	Vergleich im Gebiet Darmstadt	69
5.3.1	Straßennetzlänge	69
5.3.2	Netzabdeckung	69
5.3.3	Abbiegerelationen	70
5.3.4	Straßenattribute	70
6	Bewertung	72
6.1	Verwendung der Bewertungskriterien	72
6.2	Verwendung des Matching-Algorithmus	72
6.3	Auswahl einer Kartengrundlage	72
7	Zusammenfassung & Ausblick	73

Abbildungsverzeichnis

1.1	EmerT Webportal	1
3.1	Hausdorff Abstand	10
3.2	Parametrisierter Abstand	11
3.3	Eingeschlossene Fläche des mittleren Abstands	12
3.4	Manhattan Abstand	12
3.5	Überlagerung und Abgleich der Straßenmenge	14
3.6	Abbiegevorschriften im Graph	17
3.7	Abbiegeverbot Erkennung	18
3.8	Attribute bei M:N Kanten	19
3.9	Einteilung eines Kantenpaares	20
3.10	Ablauf der Bewertung	24
4.1	Aufbau der NAVTEQ Karte in der Ebene 2	26
4.2	Datenstruktur der OpenStreetMap	27
4.3	Letzte Änderungen in OpenStreetMap Regionen	29
4.4	Hindernisse in OpenStreetMap	33
4.5	Maximale Höhe durch Oberleitung	33
4.6	Ausschnitt OpenStreetMap	34
4.7	Löschwasserentnahmestellen in der OpenFireMap	35
4.8	Kontrast der Detaildichte in der OpenFireMap	35
4.9	Polygonausschnitt	38
4.10	Detailstufen an Knotenpunkten	42
4.11	Manuelle Änderungen im NAVTEQ 2010 Braunschweig Netz	43
4.12	Bewertung einer Kantenpaarung	48
5.1	Verwaltungsgebiete Region Hannover & Braunschweig	53
5.2	Zunahme der Reisezeiten im Verhältnis zur Referenzkarte NAVTEQ 2010	60
5.3	Zunahme der Reisezeit aufgeschlüsselt nach Referenzlänge	62
5.4	Zunahme der Weglänge aufgeschlüsselt nach Referenzlänge	62
5.5	Abweichende Attribute (Braunschweig)	65

Tabellenverzeichnis

3.1	Paar-Treffer-Tabelle	14
3.2	Einteilung der Attribute der Teilkanten	20
4.1	Straßenklassen in OpenStreetMap geordnet nach absteigender Priorität	30
4.2	Beispieldefinition eines OpenStreetMap-Weges	30
4.3	Zuordnungstabelle FRC (OSM-NAVTEQ)	37
4.4	Zuordnungstabelle von NAVTEQ und OSM	37
4.5	Zuordnung der Geschwindigkeit von NetConvert und NAVTEQ zu OpenStreetMap	39
4.6	Zuordnung der Geschwindigkeit bei fehlender Geschwindigkeitsangabe	40
4.7	Geschwindigkeitzuordnung in NetConvert	40
4.8	Kanten-Treffer-Qualität Definition	45
4.9	Kanten-Treffer-Qualität bei OpenLR	47
4.10	Kanten-Treffer-Qualität ohne Grenzwert	51
4.11	Kanten-Treffer-Qualität mit Straßenklasse	52
5.1	Weglängen Braunschweig (Rohdaten der Straßennetze)	55
5.2	Anzahl gefundene Kanten (Rohdaten, Braunschweig)	56
5.3	Gemeinsame Straßenlänge [km] (Rohdaten, Braunschweig)	56
5.4	Gemeinsame Straßenlänge [km] (öffentliche Straßen, Braunschweig)	56
5.5	Gemeinsame Straßenlänge (Simulationsnetz)	56
5.6	Abbiegerelationen Braunschweig (öffentliche Straßen)	58
5.7	Abbiegerelationen Braunschweig (Simulationsnetz)	58
5.8	Abbiegerelationen Braunschweig (Simulationsnetz, keine Kehrtwende)	58
5.9	Zunahme von Reiseweg und Dauer im Durchschnitt gegenüber NAVTEQ 2010	61
5.10	Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Braunschweig)	63
5.11	Vergleich der Attribute in den konvertierten Daten (Braunschweig)	63
5.12	Weglängen Hannover (Rohdaten der Straßennetze)	66
5.13	Abbiegerelationen Hannover	66
5.14	Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Hannover)	68
5.15	Weglängen Darmstadt (Rohdaten der Straßennetze)	69
5.16	Netzüberlagerung Darmstadt, Rohdaten	70
5.17	Abbiegerelationen Darmstadt	70
5.18	Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Darmstadt)	71

Glossar

NAVTEQ

Ein Hersteller digitaler Straßenkarten, Seite [25](#)

NetConvert

Ein Werkzeug, mit dem digitale Straßenkarten aus verschiedenen Dateiformaten für die Verkehrsflusssimulation aufbereitet werden, Seite [38](#)

OpenLR Open Location Referencing, ein Verfahren zur En- und Decodierung von Straßen und Routenverläufen, [46](#)

OpenStreetMap

Eine Quelle für digitale Straßenkarten, Seite [27](#)

Referenzkarte

Die digitale Straßenkarte, deren Straßen/Kanten 1:N durch die Testkarte abgebildet werden, Seite [9](#)

Straßenklasse

Einteilung der Straßen nach ihrer Wichtigkeit von einer niedrigen Zahl (wichtig) bis hohen (unbedeutend). Die Kartenquellen verfolgen dabei jeweils eine eigene Logik, Seite [36](#)

Testkarte

Eine digitale Straßenkarte, über welche versucht wird das Referenznetz abzubilden, Seite [9](#)

Überlagerung

Zwei Straßen/Kanten aus unterschiedlichen Karten überlagern sich, wenn sie die selbe Position beschreiben, d.h. sie bilden das selbe real existierende Objekt ab, Seite [45](#)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Bei unvorhergesehenen Naturereignissen ist es für Rettungskräfte wichtig, einen Überblick über ein betroffenes Gebiet zu erhalten. Die Lage muss auch für nicht ortskundige Kräfte erkennbar sein. Dafür ist es notwendig, aktuellste Informationen vorliegen zu haben, mit denen der Einsatzort und die Transportwege von Menschen und schwerem Gerät geplant werden.

Seit dem Jahr 2002, als das Hochwasser an der Elbe schwere Zerstörung anrichtete, arbeitet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) eng mit Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) zusammen und stellt unter anderem aktuelle Satellitendaten zur Verfügung, auf deren Grundlage das Ausmaß der Überflutung festgestellt wurde und die Einsatzplanung die Kräfte koordinierte. 2010 startete in Zusammenarbeit mit der Polizei und dem Technischen Hilfswerk das Projekt VABENE (Verkehrsmanagement bei Großereignissen und Katastrophen)¹. Ziel ist es, den Behörden Hilfestellung und Empfehlungen bei Großereignissen und Katastrophen zu geben. Ein Projekt zur Routensuche von Einsatzfahrzeugen sowie zur Planung und Aufrechterhaltung der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur im Krisenfall ist das EmerT System² (Emergency Mobility of Rescue Forces and Regular Traffic). Unter Bereitstellung von Satelliten- und Luftbildern sowie digitaler Verkehrsnetzwerken ermöglicht dieses System detaillierte Momentaufnahmen des aktuellen Geschehens und der Verkehrslage anzuzeigen. Diese Informationen werden den Einsatzkräften umgehend über ein Webportal zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: EmerT Webportal

Mit dem Nachfolgeprojekt VABENE++ begann 2014 die Bemühung, die Ergebnisse von VABENE aus dem Status des Prototypen zur Einsatzbereitschaft zu bringen. Daran beteiligen sich

¹<http://www.dlr.de/vabene/>[28.09.2014]

²http://www.dlr.de/vabene/Portaldata/78/Resources/dokumente/AU_TS_EmerT_Handout_akt.pdf

fünf Institute des DLR sowie zwei Forschungsinstitute der Technischen Universität München und der Universität Osnabrück.

Ihre Aufgabe ist die Weiterentwicklung der Erkennungsfähigkeit von Objekten und Fahrzeugen auf Satelliten und Luftbildaufnahmen. Auf diese Weise sollen Verkehrsparameter zuverlässiger erfasst und das Transportvolumen von Verkehrsnetzen festgestellt werden. Diese Kapazitäten werden über eine Verkehrsflusssimulation bestimmt und Verkehrsströme für den Krisenfall prognostiziert. Die Informationen werden für die Bestimmung der Routen von Rettungskräften und bei der Koordinierung von Evakuierungsaktionen benötigt. Handlungsempfehlungen werden aus diesen Daten abgeleitet und der Einsatzleitung direkt über das EmerT System Portal angezeigt. Die Basis für die Simulation stellt ein digitales Straßennetz dar. Als Bezugsquellen stehen sowohl lizenzierte als auch freie Quellen zur Verfügung. Als grundlegendes Netz wird momentan eine digitale Straßenkarte des Anbieters NAVTEQ genutzt. Die Verwendung des Materials aus der OpenStreetMap verspricht eine größere Anzahl an Informationen, die jedoch nicht verifiziert wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Karte für die gegebenen Anforderungen definiert und eine Bewertungsgrundlage eingeführt.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst die Begrifflichkeiten der zu entwickelnden Metrik diskutiert und die bisherigen Erfahrungen und Erkenntnisse beim Vergleich digitaler Straßenkarten zusammengetragen.

Der Verwendungsbereich solcher Karten ist sehr vielfältig. Die Eigenschaften und Kriterien, welche für die Aufgaben des DLR von Interesse sind, werden in Kapitel 3 aufgeführt. Die Entwicklung der Bewertungsverfahren ordnet sich von einer ganzheitlichen Verkehrsnetz-Betrachtung bis hin zum Vergleich der Information einzelner Straßen.

Nach den theoretischen Grundlagen werden die verwendeten Technologien aufgeführt. Das Kapitel 4 befasst sich mit den für die praktische Bewertung genutzten Daten. Die Vorstellung der NAVTEQ und OpenStreetMap Karten umfasst eine detaillierte Beschreibung ihrer Datenstruktur und des noch möglichen Potentials der enthaltenen Informationen. Für die Durchführung werden beide Karten in ein spezielles Datenformat konvertiert. Das Verarbeitungstool und das Format sind anschließend erklärt.

Die Auswahl und Entwicklung eines Algorithmus zur Erkennung von sich überlagernden Straßen schließt das Kapitel ab.

Die vorgestellten Bewertungsverfahren werden am Beispiel der Städte Braunschweig, Hannover und Darmstadt im Vergleich der Karten aus NAVTEQ und OpenStreetMap demonstriert. Die Interpretation der Ergebnisse und die Deutung von aufgetretenen Konflikten umfasst das Kapitel 5.

Abschließend findet eine Zusammenfassung und eine Aussicht auf weiterführende Themen zum erweiterten Vergleich digitaler Straßenkarten statt.

2 Stand der Technik

2.1 Einführung von Metriken

Die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Metrik soll bei der Auswahl einer digitalen Straßenkarte aus einer Menge vorliegender Karten helfen. Zunächst werden die Begriffe der (mathematischen) Metrik und der Software-Metrik vorgestellt, um anschließend eine Diskussion über die hier einzusetzende Variante zu führen.

2.1.1 Mathematische Metrik

Mit dem Begriff der Metrik wird in der Mathematik der Abstandsbegriff bezeichnet und beschreibt die Bildung eines Skalars, der den Unterschied zweier Elemente voneinander beziffert. Eine Abstandsmetrik der Mathematik d ist ein Maß für die Übereinstimmung zweier Elemente x, y einer Menge X .

$$d : X \times X \rightarrow \mathbb{R} \quad (2.1)$$

Der Abstand der Elemente ist Null, wenn sie gleich sind. Bei Ungleichheit wird der Zahlenwert niemals negativ.

$$d(x, y) \geq 0 \quad (2.2)$$

$$d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y \quad (2.3)$$

Die Metrik ist symmetrisch.

$$d(x, y) = d(y, x) \quad (2.4)$$

Die Dreiecksungleichung mit einem dritten Element z muss erfüllt sein.

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \quad (2.5)$$

2.1.2 Software-Metrik

Im Bereich von Programmen und Algorithmen hat die Metrik eine andere Bedeutung. Eine Software-Metrik gibt für Bereiche wie Komplexität, Leistung und Modifizierbarkeit je eine Maßzahl an [11], welche die verschiedenen Aspekte bewertet.

Eine Bewertung komplexer Gebilde, wie der digitalen Straßenkarten, erfordert eine besondere Betrachtung der Anforderungen, die an das Datenmaterial gestellt werden. Die Auswahl einer geeigneten Datengrundlage ist vom geplanten Einsatzgebiet abhängig.

Für die differenzierte Auswahl ist eine Quantifizierung der Unterschiede in n einzelnen Kategorien notwendig.

$$d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (2.6)$$

Bei digitalen Straßenkarten ist die Auswahl einer Referenz meist nicht möglich, da jede Karte nur eine idealisierte Form der Realität darstellt. Daher sind sie lediglich Teilmengen, denen

Informationen wechselseitig fehlen oder widersprechen können. Auftretende Konflikte sind als solche zu identifizieren, jedoch nicht zu lösen. Fehlende oder zusätzliche Elemente machen eine Bestimmung kompliziert, da sie eine Umkehrung (Gegenprobe) erschweren oder sogar verhindern. Die Bewertung benötigt in diesem Fall eine Gegenüberstellung der Ergebnisse. Da diese Bewertung nicht symmetrisch ist, findet die Auswertung anhand von unsymmetrischen Ergebnissen statt.

$$d_g(x, y) \neq d_g(y, x) \quad (2.7)$$

Eine „unsymmetrische Metrik“ ermöglicht eine gerichtete Bewertung wie „ x ist besser als y in einem Bereich k “.

Die zu verwendenden Kriterien für die Wahl einer geeigneten digitalen Straßenkarte unterscheiden sich nach Anwendungsfall. Im Folgenden werden die einzelnen Gütekriterien $g(x, y)$ vorgestellt, welche die in Abschnitt 3.1 gestellten Anforderungen an das Kartenmaterial quantifizieren. Die einzelnen Kriterien g_k werden als Skalar berechnet.

$$g_k : X \times X \rightarrow \mathbb{R} \quad (2.8)$$

Durch ihre übersichtliche Anordnung ist es möglich einzelne Aspekte zu identifizieren und gezielt zu bewerten.

$$d_g(x, y) = d\left(\begin{pmatrix} g_1(x, y) \\ g_2(x, y) \\ \vdots \\ g_n(x, y) \end{pmatrix}\right) \quad (2.9)$$

Wahl einer Bewertungsmetrik

Die mathematische Variante der Metrik kann nur den Abstand (Unterschied) zwischen zwei Karten angeben. Für die Nutzung ihrer Ergebnisse als Entscheidungshilfe ist ein vertrauenswürdiger Referenzdatensatz erforderlich, von dem aus die Fehler der zu testenden Karte bestimmt werden können. Da ein solcher Datensatz nicht bekannt ist, reicht eine einfache Abstandsdefinition für eine Bewertung nicht aus.

Eine Auswahl kann besser über die gezielte Qualitätsprüfung einzelner Teilaspekte der Karte erfolgen. Die Gewichtung der Ergebnisse kann entsprechend den gestellten Anforderungen an das Kartenmaterial erfolgen.

Aufgrund der noch nicht vorhandenen allumfassenden Referenzkarte und der besseren Bewertungsmöglichkeiten wird die Entwicklung einer Software-Metrik ähnlichen Bewertungsgrundlage angestrebt. Im Folgenden werden bereits existierende Anforderungen und Verfahren für Teilaspekte beim Vergleich digitaler Straßenkarten vorgestellt.

2.2 Bewertungskonzepte

Der Vergleich der Güte digitaler Straßenkarten verschiedener Quellen ist ein stark diskutiertes Thema. Van Oort stellt in [17] im Bezug auf Gebietskarten eine Reihe von separat zu untersu-

chenden Merkmalen auf, die für geographische Karten gelten und von vielen späteren Publikationen genannt werden:

Completeness Die Vollständigkeit der Abbildung der realen Welt. Dazu zählt nicht nur das Vorhandensein existierender Objekte, sondern auch das Fehlen nicht (mehr) existierender Objekte.

Consistency Der eindeutige Zusammenhang von Objekten untereinander. Eine korrekte topologische Darstellung der Beziehungen ist besonders gut mit vektorisierten Kartendaten zu erreichen, da sie Informationen über Verknüpfungspunkte und Nachbarschaftsbeziehungen enthalten.

Accuracy Die Präzision wird in weitere Teilaspekte unterteilt:

Zeitliche Präzision bezieht sich auf die Aktualität der Karten nach Veränderungen in der Realität.

Bei der *räumlichen Positionierung* kommt es auf eine geringe Abweichung des realen vom beschriebenen Standort an.

Den *Eigenschaften* der aufgezeichneten Objekte kommt eine besondere Bedeutung zu. Unterschiede werden auf unterschiedlichen Verhältnisebenen bewertet.

Lineage Der Ursprung der Kartendaten bezieht sich auf das Alter der Daten und die Kartographieermethoden. Dadurch ist auf die Vertrauenswürdigkeit der Quelle zu schließen.

Usage, Purpose, Constraints Die Anwendbarkeit der Daten für die aktuelle Aufgabe ist zu untersuchen. Das für einen Zweck verwendete Kartenmaterial muss nicht auch für diesen aufbereitet worden sein. In diesem Fall sind eventuell Informationen nicht in benötigtem Umfang oder Genauigkeit vorhanden.

Die von van Oort genannten Merkmale beziehen sich in seiner Arbeit auf Flächenkarten, werden jedoch auch auf Straßenkarten angewandt.

Untersuchung der Vollständigkeit

Ein einfaches Mittel zur Untersuchung der Vollständigkeit ist die Gegenüberstellung der summierten Weglängen [9], wobei eine Karte als vertrauenswürdige Grundmenge bekannt ist, gegen die eine Testkarte geprüft wird. Diese Auswertung wirft sogleich Fragen nach dem Ursprung der Informationen auf. Wenn die Karten für unterschiedliche Zwecke erhoben wurden, ist die Aussagekraft eingeschränkt. Wurde beispielsweise die Referenzkarte nur für Kraftfahrzeuge oder für öffentlich zugängliches Gebiet angelegt, während die Testkarte auch Fußwege, Forstwege usw. enthält, wird die Differenz sehr groß. Selbst wenn die Referenzkarte alle vorhandenen Wege abdeckt, in der Testkarte jedoch Fuß- und Radwege parallel zu Straßen einzeln angegeben sind, kann der Umfang der Testkarte den der Referenzkarte übersteigen. Es ist daher besonders wichtig nicht nur die Geometrie sondern auch die Fortbewegungsweise auf den digitalen Karten zu untersuchen.

Eine detailliertere Untersuchung der Qualität von Attributen in digitalen Karten nehmen Ludwig et al. in [14] vor. Es werden die gleichen Kartenanbieter wie auch in dieser Arbeit untersucht. Zur Untersuchung von Attributen wurde ein Zuordnungsverfahren (Matching) eingeführt, wel-

ches es ermöglicht, über geometrische Nähe zwei sich entsprechende Straßen zu finden. Solche Straßen-Paare wurden auf ihre Präzision hinsichtlich der Position, der Länge und des Straßennamens untersucht. Das Ergebnis ist eine Auswertung von Teilaspekten der Karten in ausgewählten deutschen Großstädten. Vereinzelte Auffälligkeiten über die Benennung der Straßen oder Attribute, wie die Kennzeichnung von Einbahnstraßen, werden ebenso beschrieben wie die relative Vollständigkeit der Testkarte.

Eine Untersuchung der Verwendbarkeit der Karten als Grundlage für eine Routensuche erfolgt nicht, da das Material der OpenStreetMap nicht als Navigations-Graph geeignet erschien.

Inzwischen ist die Menge der Informationen der Daten in OpenStreetMap auf das 5-fache des Wertes von 2010 angestiegen³. Die freien Daten werden für öffentliche Orientierungskarten und für die Routensuche benutzt. Dienste wie Skobbler⁴ oder das Projekt OSRM⁵ des KIT⁶ und weitere bieten bereits komfortable Anwendungen für die Suche von Wegen für Kraftfahrzeuge, Rad oder Fußgänger. Aussagen über die Qualität des Materials werden dabei nicht getroffen.

Eine Untersuchung des aktuellen Datenbestands unter zusätzlicher Analyse des Navigations-Graphen ist sinnvoll, um detailliertere Aussagen über die Nutzbarkeit von digitalen Straßenkarten treffen zu können.

³<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Stats>[27.07.2014]

⁴<http://maps.skobbler.de/>[28.07.2014]

⁵<http://map.project-osrm.org/>[28.07.2014]

⁶Karlsruher Institut für Technologie, <http://algo2.iti.kit.edu/routeplanning.php>[28.07.2014]

3 Bewertungskriterien

3.1 Anforderungen

Das digitale Kartenmaterial wird im Rahmen dieser Arbeit für die Anwendung in zwei verschiedenen Bereiche untersucht. Bei der Navigation und Routensuche (Routing) wird es eingesetzt, um den besten Verbindungsweg in einem Verkehrsnetz zu finden. Für die Verkehrsflusssimulation dient es als Grundlage, um über Computermodelle das Verhalten von Verkehrsteilnehmern nachzustellen oder in fiktiven Szenarien Verkehrsströme zu prognostizieren. Die Anforderungen unterscheiden sich zum Teil wesentlich. Daher werden sie in ihren Aufgabenbereichen getrennt analysiert.

3.1.1 Routensuche

Für die Bestimmung von einzelnen Routen ist die Netzzollständigkeit wichtig. Die Erreichbarkeit jeder Position ist dabei nicht nur von der Existenz der Straßen, sondern auch von der korrekten Vernetzung untereinander abhängig. Wegebeziehungen geben die möglichen Abbiegevorgänge vor, damit Routen nicht gegen die realen Verkehrsvorschriften verstoßen. Die Richtung von Einbahnstraßen ist ebenso wichtig wie die Sperrung von Straßen für bestimmte Fahrzeugklassen.

Die Empfehlung einer Route wird meist auf Basis des kürzesten oder des schnellsten Weges getroffen. Dazu werden Informationen über die Länge und Geometrie der Straßen, sowie der erlaubten Höchstgeschwindigkeit benötigt.

Diese Angaben reichen aus, um Routen für PKW zu erstellen, deren Ausmaße beschränkt sind.

Rettungskräfte Bei der Wegsuche für Einsatzkräfte wird die Liste der Anforderungen um einige Punkte erweitert. Zulässige Höhe, Breite und Gewicht schränken die Bewegungsmöglichkeiten von schweren Einsatzfahrzeugen ein, zu denen nicht nur Feuerwehrfahrzeuge wie Drehleitern sondern auch Bergungsfahrzeuge wie Autokrane zählen.

Zusätzlich zu den für PKW zugänglichen Bereichen können auch offene Flächen oder private Wege für das Erreichen von Orten genutzt werden. Die Zugänglichkeit zu Rettungswegen kann jedoch durch verschiedenartige Barrieren verhindert werden. Klapp- oder Steckpoller sind mit der Möglichkeit zur Öffnung des Durchwegs durch die Rettungskräfte versehen. Absenkbare oder fest installierte Barrieren können nicht mit Sicherheit entfernt werden. Schranken und Tore versperren möglicherweise eine Zufahrt. Solche Informationen in Straßenkarten sind eine wertvolle Hilfe für Einsatzkräfte.

Ein Beispiel für befahrbare Wege, die nicht für PKW zugänglich sind, jedoch von Rettungskräften genutzt werden können, stellen Busspuren oder Fußgängerzonen dar. Ihre Lage ermöglicht das Ausweichen von Rettungskräften aus dem stockenden Straßenverkehr und ein schnelleres Erreichen des Einsatzortes.

Gefahren können dort entstehen, wo der Einsatz besonderer Einsatzfahrzeuge nicht vorgesehen aber möglich ist, etwa wenn Busspuren zusammen mit Straßenbahnen verlaufen. In einem solchen Fall ist darauf zu achten, dass der Fahrdraht der Straßenbahn kein Hindernis für die Einsatzfahrzeuge darstellt.

Für besondere Fahrzeuge ist daher auf die erlaubte Höhe, Breite und Belastung des Rettungsweges zu achten.

Zusammenfassung Für das Routing sind die folgenden Punkte von wesentlicher Bedeutung:

- Vollständigkeit der Karte bezogen auf Straßen und Knotenpunkte
- Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten
- Richtungsabhängigkeiten (Einbahnstraßen, Autobahnauffahrten)
- Erlaubte Fahrzeugklassen
- Erlaubte Maße
- Geschwindigkeiten

3.1.2 Verkehrsflusssimulation

Die Verkehrsflusssimulation betrachtet die Wechselwirkung vieler Verkehrsteilnehmer untereinander. Die Anforderungen an das digitale Kartenmaterial verschärfen sich daher im Vergleich zum Routing.

Die Anzahl der Fahrspuren ist eine der wichtigsten und grundlegendsten Informationen, die zur Verfügung stehen muss, um das Verhalten bei Bewegungen auf einer Straße abbilden und die Verkehrskapazität bestimmen zu können. Weitere Informationen sind Spur-Wechsel-Einschränkungen und besondere Fahrspureinschränkungen (z.B. Busspur).

Von besonderem Interesse ist das Verhalten der Verkehrsteilnehmer an Knotenpunkten. Dabei sind die Abbiegespuren und einzelnen Abbiegebeziehungen je Spur von Bedeutung.

Die Vorfahrtsregelung, die Signalschaltung und die Position der Haltelinien ermöglichen erst die getreue Simulation eines Knotenpunktes.

Zu untersuchende Informationen sind:

- Spuranzahl
- Abbiegespuren
- Spur-Wechsel-Einschränkung (Überholverbot)
- Spur-Klassen-Einschränkung (Bus/Taxi/PKW frei)
- Vorfahrtsregelung
- Halteposition
- Signalschaltung

3.1.3 Referenznetz

Als Grundlage der Bewertung ist eine *Referenzkarte* zu wählen, gegen die eine *Testkarte* untersucht wird. Die Referenzkarte (Grundmenge an Wegen) ist dabei eine vertrauenswürdige Quelle, die vollständig und aktuell ist. Ihr gegenüber sind alle Information der Testkarte nur eine Teilmenge dieser Grundmenge.

Für den Fall, dass keine gesicherte Information über die Vertrauenswürdigkeit der Quellen vorliegt, kann eine Bewertung der Daten nur gegeneinander erfolgen. Dabei kommt es zu Konflikten, deren Behandlung und Lösung wiederum durch eine Prüfung mit einer Referenz oder der Realität erfolgt.

Die Feststellung über die Nutzbarkeit als Referenzdatensatz kann meist vor Beginn einer Untersuchung nicht erfolgen. In dieser Arbeit werden die theoretischen Begriffe der „Referenz-“ und „Testkarte“ in einem anderen Zusammenhang genutzt. Die Referenz bezeichnet immer die Karte, gegen welche die zweite Karte (Testkarte) geprüft wird. Obwohl die Realitätstreue der Referenz nicht gesichert ist, wird sie als solche angenommen. Für eine Gegenprobe werden Test- und Referenzkarte getauscht.

Die gestellten Anforderungen befinden sich auf zwei unterschiedlichen Betrachtungsebenen des digitalen Kartenmaterials. Es werden die Ebenen *Strategie* und *Taktik* unterschieden [22].

Das Routing findet auf dem strategischen Kartenmaterial statt. Es wird für die Planung bei großem zeitlichen und räumlichen Horizont genutzt. Die Erreichbarkeit von Orten steht im Vordergrund, die Vernetzung ist auf dieser abstrahierten Ebene von Interesse.

Die taktische Karte wird hingegen bei lokaler Betrachtung benötigt. Dort ist beispielsweise die genaue Zahl und Lage von Abbiegespuren für die Verkehrsteilnehmer wichtig.

Für die Navigation und das Routing wird zunächst das Straßennetz als Ganzes bewertet. Die darin enthaltenen Informationen einzelner Straßen sind zusätzlich auch für die taktische Ebene der Verkehrsflusssimulation wichtig. Daher werden sie in einem gesonderten Kapitel entwickelt.

3.2 Genauigkeit der Positionierung

Die Positionierung der Straßengeometrien ist ein wichtiges Kriterium für die Erkennung der Deckungsgleichheit.

Um den Abstand der Wege zueinander zu bestimmen, kommen verschiedene Abstandsdefinitionen zum Einsatz. Jede der Folgenden wird im Verlauf dieser Arbeit genutzt, um spezielle geometrische Eigenschaften von oder zwischen Wegen zu quantifizieren.

3.2.1 Hausdorff Abstand

Eine häufig verwendete Metrik zur Bestimmung des Abstandes geometrischer Objekte (A, B) ist die Hausdorffmetrik. Sie ist der größte Abstand unter den kleinsten Entfernungen (d_{cp}) aller Punkte zur jeweils anderen Geometrie [10].

$$DH(A, B) := \max(\sup_{x \in A} d_{cp}(x, B), \sup_{x \in B} d_{cp}(x, A)) \quad (3.1)$$

Dabei ist d_{cp} der kürzeste Abstand (Closest Point Distance) aller möglichen euklidischen Abstände $d(x, y)$.

$$d_{cp}(x, y) := \inf_{x \in A} d(x, y) \quad \forall y \in B \quad (3.2)$$

Der Hausdorff Abstand ist das Maximum zweier Abstände, die jeweils als *gerichteter* oder *einseitiger Hausdorff Abstand* bezeichnet werden [20].

$$D_{H, A \rightarrow B} := \left(\sup_{x \in A} \left(\inf_{y \in B} d(x, y) \right) \right) \quad (3.3)$$

$$D_{H, B \rightarrow A} := \left(\sup_{y \in B} \left(\inf_{x \in A} d(x, y) \right) \right) \quad (3.4)$$

$$D_H(A, B) = \max(D_{H, A \rightarrow B}, D_{H, B \rightarrow A}) \quad (3.5)$$

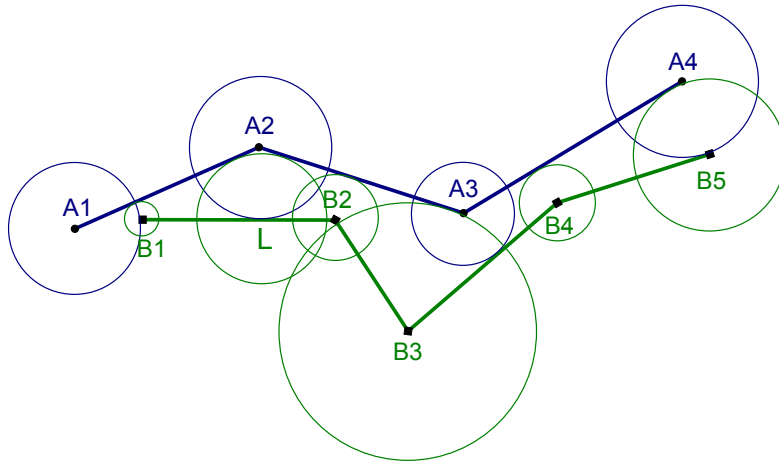


Abbildung 3.1: Hausdorff Abstand

Die Abbildung 3.1 verdeutlicht die Funktionsweise. Die Kreise markieren den kürzesten Abstand zwischen einem Punkt auf einer Geometrie zur jeweils anderen Geometrie. Die Betrachtung lediglich des Abstandes der Knoten ist dabei nicht ausreichend. Zur Berechnung werden alle Punkte auf der Geometrie untersucht. Zu erkennen ist dies an der ersten Linie des unteren (grünen) Polygonzugs. Die Punkte B1 und B2 haben einen deutlich kleineren Abstandsradius als ein Punkt auf der Linie (L).

Die Asymmetrie der gerichteten Abstände wird am Punkt A4 des oberen (blauen) Polygonzugs deutlich. Punkt A4 hat den größten Radius, der zudem annähernd identisch mit dem Radius des unteren Punkts B5 ist. Trotz des Maximums auf dem oberen Polygonzug ist dieser Abstand nicht der Wert der symmetrischen Hausdorff Distanz. Es wird das Maximum auf der unteren Geometrie (in Punkt B3) genutzt.

Bei gutmütigem (d.h. gleichmäßigem, parallelem) Verlauf der zwei Polygonzüge tritt der größte Abstand häufig am Anfang oder Ende auf. In der Abbildung ist dies am Knoten A1 zu erkennen, der verglichen mit dem Startknoten B1 einen sehr großen Radius aufweist, obwohl beide Linien bis B1 dicht beieinander liegen.

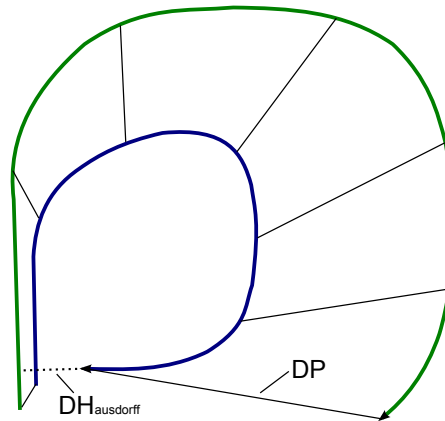


Abbildung 3.2: Parametrisierter Abstand

3.2.2 Parametrisierter Abstand

Die Hausdorff-Metrik betrachtet die Geometrie als Ganzes. Polygonzüge sind im vorliegenden Fall meist Beschreibungen von Routen, auf denen eine Zeit- und Ortsbestimmung möglich ist. Um den Unterschied zwischen Routen zu erfassen ist die Abstandsberechnung abhängig von einem Laufparameter sinnvoll. Die **Fréchet Metrik** ist hierfür geeignet.

Seien zwei Polygonzüge A, B , beschrieben durch die Funktionen f, g jeweils mit den Laufparametern $\alpha(t)$ und $\beta(t)$, wobei t die relative Position im Intervall $[0, 1]$ angibt, dann ist die Fréchet Distanz [2]:

$$D_F(f, g) := \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} d(f(\alpha(t)), g(\beta(t))) \quad (3.6)$$

Dabei sind α und β monotone Funktionen (d.h. kein rückwärtiger Verlauf). Bei diesem Verfahren wird der kürzeste mögliche Abstand zwischen den Kurven gesucht, der nötig ist, um eine Verbindungslinie zwischen ihnen herzustellen (siehe Abbildung 3.2).

Mit einer vereinfachten Betrachtung kann der komplexe Vorgang angepasst werden. Unter der Annahme, dass α und β für $t \in [0, 1]$ linear verlaufen (keine Beschleunigung und kein Bremsen), werden auf f und g nur zwei Punkte definiert, zwischen denen der Abstand bestimmt ist. Die Metrik ergibt sich somit zu:

$$D_P(f, g) := \max_{t \in [0, 1]} d(f(t), g(t)) \quad (3.7)$$

3.2.3 Mittlerer Abstand

Für die Betrachtung der Gesamtgeometrie wird der mittlere Abstand zwischen zwei Linien (f und g) berechnet. Dabei muss eine Referenzgeometrie bekannt sein, deren Länge als Anhaltspunkt dient. Zwischen den Polygonzügen wird eine Fläche aufgespannt und diese über die Referenzlänge in einen durchschnittlichen Abstand umgerechnet.

Bei überschlagenen Polygonen wird die Fläche in Teilflächen zerlegt, deren Beträge addiert werden. Der Schritt des Aufteilens ist nötig, da bei der herkömmlichen Flächenberechnung die

überschlagenen Bereiche negativ in die Summe eingehen und der Abstand unterschätzt würde.

$$D_M(f, g) = \frac{A(f, g)}{L(f)} \quad (3.8)$$

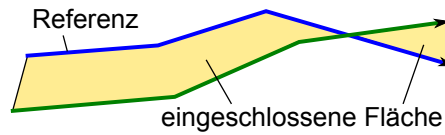


Abbildung 3.3: Eingeschlossene Fläche des mittleren Abstands

3.2.4 Manhattan Abstand

Der Name dieser Metrik zum Längenvergleich bezieht sich auf die quadratischen Häuserblöcke in amerikanischen Großstädten, deren Straßen im rechten Winkel zueinander verlaufen. Bei diagonalen Routensuchen kann der kürzeste zurückgelegte Weg über eine Vielzahl von Alternativen geschehen, da keine Abkürzungen über diagonale Straßen möglich sind (siehe Abbildung 3.4).



Quelle(Straßenlayer):[23]

Abbildung 3.4: Manhattan Abstand

Da nur zwei Orientierungsrichtungen (Vektoren e_1 , e_2) vorhanden sind, wird eine Route als beliebige Kombination aus Abschnitten dieser Richtungen. Zusammengefasst hat das Ergebnis die gleiche Länge auch wenn die Lage der Route unterschiedlich ist.

Die Distanz zwischen einem Startpunkt S und dem Zielpunkt Z ist definiert als die betragsmäßige Summe der Differenz der Koordinaten [12].

$$D_{MH}(S, Z) = |S_1 - Z_1| + |S_2 - Z_2| \quad (3.9)$$

3.3 Vollständigkeit

Ein erster Hinweis auf die Vollständigkeit eines digitalen Straßennetzes wird über die Summe der Länge der enthaltenen Straßen und Wege bestimmt.

3.3.1 Gesamtlänge der Straßennetze

Die bei Haklay [9] genutzte Summe ist abhängig von der Größe des zu prüfenden Gebietes. In einem einzelnen Vergleich ist die *totale* Differenz der verfügbaren Weglängen dennoch aussagekräftig.

$$\sum (\text{Weglänge Referenzkarte}) - \sum (\text{Weglänge Testkarte}) \quad (3.10)$$

Wird eine Untersuchung auf verschiedene Gebiete ausgeweitet, um etwa die Qualität einer Karte nicht nur lokal sondern überregional zu bewerten, ist eine *relative* Bewertung nötig. Die Bildung eines Quotienten ist unabhängig von der Gebietsgröße und daher besser geeignet für die Untersuchung.

Bei der Bildung der einzelnen Summen ist auf den Ursprung und Verwendungszweck des Kartenmaterials zu achten. Die Aufsummierung der Längen erfordert eine vorherige Filterung und Selektion der Wege, um belastbare Aussagen zu treffen. Dabei ist auf die Orientierung und den Zweck der Wege zu achten, denn alle digitale Straßenkarten liefern nur einen idealisierten Ausschnitt der Realität, dessen Inhalte sich unterscheiden können. Straßenkarten verzeichnen andere Wege als Fahrrad- oder Wanderkarten. Ein Vergleich solcher Quellen ist daher erst nach der Eingrenzung auf gemeinsam genutzte Fortbewegungsmittel möglich.

Zusätzlich wird die Orientierung der Wege so gewertet, dass aus der Länge auf falsch zugeordnete Einbahnstraßen geschlossen werden kann. Dazu werden beidseitig befahrbare Straßen mit ihrer doppelten Länge in die Summe aufgenommen. Einige digitale Karten modellieren ihre Richtungsfahrbahnen bereits als einzelne Objekte. Da dies nicht bei allen gleichermaßen vorkommt, ist auf die einheitliche Summierung zu achten.

Ein Quotient ermöglicht die qualitative Bewertung einer Straßenkarte ohne einen großen Aufwand darzustellen.

$$\frac{\sum (\text{Weglänge Testkarte})}{\sum (\text{Weglänge Referenzkarte})} \quad (3.11)$$

Sowohl Quotient als auch Differenz lassen keine Aussagen über die Abdeckung der Gebiete zu, da nicht sichergestellt ist, dass sich die enthaltenen Straßen in beiden Karten überlagern und entsprechen. Die Anzahl der in einer Karte *zusätzlich* enthaltenen Informationen (Überschuss) kann ein wichtiges Auswahlkriterium sein. Im folgenden Kapitel wird die Einordnung von gemeinsamen und exklusiven Straßen vorgestellt.

3.3.2 Überlagerung der Straßennetze

Die Straßenmengen von zwei Karten sind gleich, wenn sich jede Straße mit einem entsprechenden Gegenstück in der anderen Karte überlagert. Zur Quantifizierung wird die Anzahl der übereinstimmenden und der nicht übereinstimmenden Kanten in ein Verhältnis gesetzt. Bei der

	ausgehend von Referenzkarte gesucht in Testkarte	ausgehend von Testkarte gesucht in Referenzkarte
gefunden	$TP_{r,t}$	$TP_{t,r}$
nicht gefunden	$FN_{r,t}$	$FN_{t,r}$

TP: True Positive - Übereinstimmungen gefunden

FN: False Negative - Keine Entsprechung gefunden

Tabelle 3.1: Paar-Treffer-Tabelle

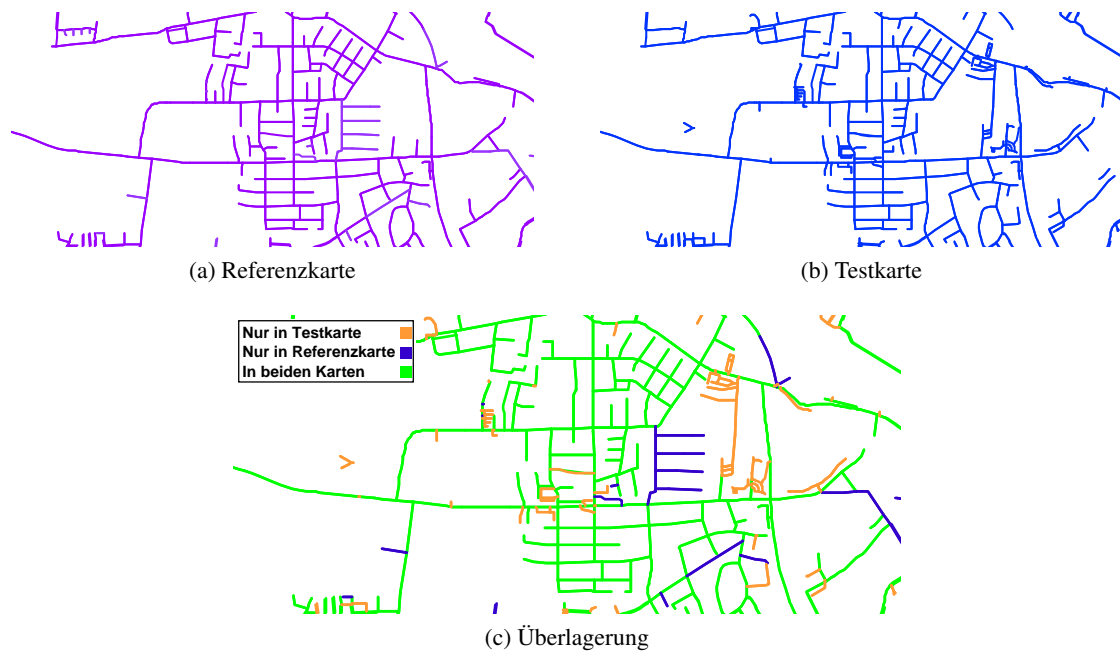


Abbildung 3.5: Überlagerung und Abgleich der Straßenmenge

Bildung eines statistischen Tests werden für jedes Straßennetz die gefundene Wegepaare als Treffer Paare (True Positive), alle anderen als Fehler (False Negative) gewertet (siehe 3.1).

Diese Bewertung geht zurück auf Biagioni und Eriksson[15], deren Mapmatching-Algorithmus als Marmel-Loch-Problem angesehen werden kann. Alle Wege aus der Referenzkarte werden als Marmeln und alle aus der Testkarte als Löcher angesehen. Der Unterschied der beiden Karten definiert sich durch die Anzahl der verbliebenen Marmeln und der nicht gefüllten Löcher.

Aus den Werten lassen sich 3 Mengen erstellen, welche die Straßen in Klassen einteilen. Die Mengen $TP_{r,t}$ und $TP_{t,r}$ entsprechen sich in der Summe ihrer Straßenlänge, jedoch nicht zwingend in der Anzahl ihrer Straßenabschnitte. Für die Analyse ist daher eine Gewichtung nach der Straßenlänge sinnvoll.

- K_{ref} - Nur in der Referenzkarte enthaltene Wege $\hat{=}$ $FN_{r,t}$

- K_{gem} - In beiden Karten gemeinsam enthaltene Wege $\hat{=} TP_{r,t} = TP_{t,r}$
- K_{test} - Nur in der Testkarte enthaltene Wege $\hat{=} FN_{t,r}$

Eine Menge G bezeichnet die Grundmenge, in der alle real existierenden Straßen enthalten sind. Wenn weder die Referenzkarte noch die Testkarte die vertrauenswürdige Grundmenge sind, beinhaltet die Menge G alle Elemente der drei Klassen. In ihr sind alle bekannten Wege enthalten.

$$G = K_{ref} + K_{gem} + K_{test} \quad (3.12)$$

Der als Abdeckung bezeichnete Quotient beschreibt den Anteil der gemeinsam genutzten Längen im Verhältnis zur Gesamtlänge der bekannten Wege.

$$\text{Abdeckung : } \frac{\sum_{K_{gem}} L}{\sum_G L} \quad (3.13)$$

$$\text{Überschuss in Referenzkarte : } \frac{\sum_{K_{ref}} L}{\sum_G L} \quad : \text{ Fehrend in Testkarte} \quad (3.14)$$

3.4 Vernetzung

3.4.1 Straßennetz-Graph

Die Erreichbarkeit im Straßennetz wird mit einem Navigationsgraphen bewertet. Dieser ist die abstrakte Darstellung des Straßennetzes, welche jede mögliche Verbindung zwischen beliebigen Orten darstellen kann.

Die weitere Untersuchung der Straßen wird auf dem Straßennetzgraphen durchgeführt. Daher wird im folgenden Abschnitt kurz auf dieses Hilfsgebilde eingegangen.

Definition Ein gerichteter Graph G ist ein Paar aus zwei Mengen V und E .

$$G = (V, E) \quad (3.15)$$

Die Menge V (Vertices) beinhaltet alle Knoten des Graphen.

Die Menge E (Edges) beinhaltet alle Kanten, auf denen eine gerichtete Verbindung zwischen zwei Knoten zulässig ist.

$$E \subseteq V \times V \quad (3.16)$$

In Bezug auf Straßennetze symbolisiert ein Knoten v einen Verkehrsknotenpunkt, eine Kante e steht für eine Verbindungsstraße.

Straßen sind im Allgemeinen in der Hin- und Gegenrichtung befahrbar. In diesem Fall werden je Straße zwei Kanten angelegt.

3.4.2 Isomorphie

Der Begriff der *Isomorphie* bezeichnet den Umstand, dass Beziehungen zwischen Objekten im Wesentlichen gleich sind. Unterschiede, welche für weiterführende Betrachtungen nicht von Bedeutung sind, werden dabei ignoriert [7].

Auf den Anwendungsfall übertragen ist dies die Eigenschaft zweier Straßenkarten in ihrer Vernetzung gleich zu sein. Dazu ist in jeder die gleiche Straßenmenge vorhanden und alle Fahrtbeziehungen sind gleichermaßen möglich. Geringfügige Positionsabweichungen und Attribute der Fahrbahnen werden nicht betrachtet. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, dass alle Knotenpunkte und Straßen eine entsprechende Repräsentation im anderen Netz haben.

Die Bewertung, in wie weit zwei Verkehrsnetze übereinstimmen, geschieht über deren Navigationsgraphen. Zwei strukturell gleiche Graphen haben die Eigenschaft der Graphenisomorphie [4]. Diese bedeutet, dass alle Knoten Entsprechungen im jeweils anderen Graphen haben und jeder Knoten über gleiche Kanten mit anderen Knoten verknüpft ist. Übertragen auf das Straßennetz bedeutet dies, dass jede erlaubte Route in beiden Graphen über die gleichen Wege möglich ist.

Beim Einsatz von Routing-Algorithmen werden Eigenschaften des Graphen in die Suche einbezogen, welche die Verkehrsbedingungen beschreiben sollen (z.B. Höchstgeschwindigkeit). Diese Angabe kann sich in zwei Karten voneinander unterscheiden. Bei der Auswertung ist daher auch auf die Übereinstimmung solcher Attribute zu achten (vergleiche Kapitel 3.5). Für die Erstellung der schnellsten Route werden Länge und Höchstgeschwindigkeit auf jeder Kante betrachtet. Bei der kürzesten Route ist lediglich die Länge das entscheidende Auswahlkriterium.

Bewertung mittels Schnittmengengraph

Die Ähnlichkeit der Routing-Graphen wird über den Vergleich von Streckenlängen und Reisezeit ausgewählter Routen untersucht. Es werden drei Graphen aus den zwei zugrundeliegenden Straßendaten erzeugt. Die jeweils vollständigen Graphen (G_{ref}/G_{test}) und ein Schnitt(-mengengraph S (auch Teilgraph genannt), welcher lediglich Kanten enthält, die in beiden Graphen enthalten sind.

Die Länge einer Route wird auf dem Teilgraphen bestimmt, ebenso wie mit identischen Start- und Zielknoten auf den vollständigen Graphen. Als Bewertungskriterium dient der Quotient der Längen.

$$\frac{L(G)}{L(S)} \in [0, 1] \quad (3.17)$$

Ähnlich des Vergleichs der Straßenlängen sagt dieser etwas über die im Straßennetz zur Verfügung stehenden Wege aus. Ein hoher Wert (nahe 1) sagt eine hohe Deckung der beiden Netze aus, da sich der Teilgraph nah am vollständigen Graph bewegt. Ein niedriger Wert kommt zustande, wenn auf dem vollständigen Netz eine viel kürzere Route gefunden wurde, als dies im gemeinsamen Netz möglich war.

Bewertung mittels Ausgangsgraphen

Eine Untersuchung auf dem vollständigen und dem gemeinsamen Graphen ist nicht möglich, wenn das Matching zum Erzeugen des Teilgraphen nicht oder nur unzureichend erfolgreich war. Fehlen wichtige Verbindungskanten, da der Algorithmus fehlerhafte Ergebnisse liefert, ist eine

Erstellung des gemeinsamen Graphen nicht möglich.

Eine Routensuche wird in diesem Fall auf beiden Graphen parallel durchgeführt und das Ergebnis im Quotienten untersucht.

$$\frac{L(G_{test})}{L(G_{ref})} \in [0, \infty] \quad (3.18)$$

Ist dieser Quotient kleiner als 1, wurde in der Testkarte ein kürzerer Weg gefunden, was eine höhere Informationsdichte der Straßen und Knotenpunkte impliziert und somit auf eine stärkere Vernetzung hindeutet. Es ist jedoch auch möglich, dass die kürzeren Wege durch nicht vorhandene *Abbiegebeschränkungen* in der Testkarte ermöglicht wurden, die in der Referenzkarte enthalten waren. Der Untersuchung und dem Auffinden von Fahrgeboten widmet sich das folgende Kapitel.

3.4.3 Abbiegevorschriften

Die Navigation im Graphen kann an Knoten durch Abbiegevorschriften eingeschränkt werden. Auf diese Weise werden nicht nur Abbiegeverbote und Gebote umgesetzt, sondern auch die Wirkung baulicher Maßnahmen abgebildet. Zur Verdeutlichung wird das häufig auftretende Beispiel einer Autobahnabfahrt gezeigt. Der Zubringer und die Ausfahrt werden mitunter als eine in beide Richtungen befahrbare Kante modelliert, deren Anfangs- und Endknoten jeweils aus beiden Fahrtrichtungen erreichbar sind. Zur Erkennung von fehlenden Abbiegevorschriften reicht es

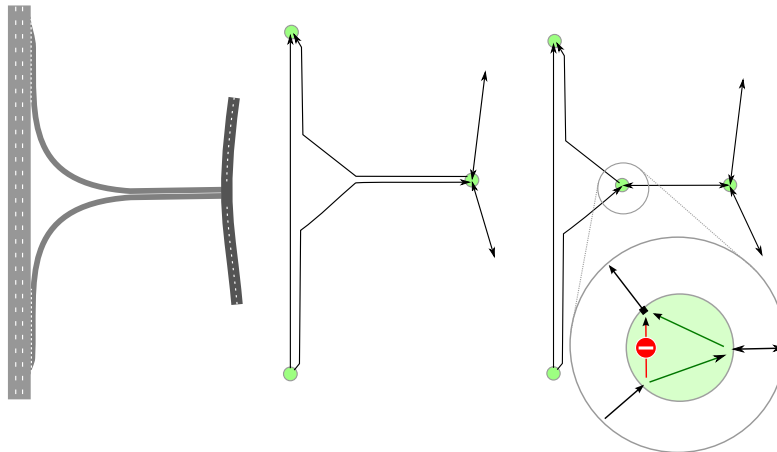


Abbildung 3.6: Abbiegevorschriften im Graph – **links:** Autobahn-auf-/abfahrt **mittig:** Getrennte Modellierung **rechts:** Gemeinsame Modellierung mit Abbiegeverbot

nicht aus, lediglich festzustellen, ob dieselben Verbote explizit in beiden Straßenkarten eingetragen sind. Es ist möglich ein Verbot direkt über die Topologie des Navigationsgraphen zu modellieren. In Abbildung 3.6 ist ein solcher Fall dargestellt. Durch die getrennten Kanten (mittig) wird die Angabe eines Abbiegeverbotes (rechts) überflüssig. Eine bloße Feststellung, dass die im rechten Bild vorhandene Beschränkung im mittleren Bild nicht existiert darf nicht dazu führen, dass der mittlere Graph schlechter bewertet wird.

Für die Erkennung von fehlenden Abbiegebeschränkungen wird für jedes explizite Vorkommen eine Vernetzungsanalyse auf dem Graphen durchgeführt. Zunächst werden in der Karte mit bekanntem Verbot zwei Routen bestimmt. Eine unter Berücksichtigung des Abbiegeverbots sowie eine unter Missachtung (siehe Abbildung 3.7). Anschließend wird die Route auf der Test-Karte

wiederholt und untersucht, ob die Geometrie des zurückgelegten Weges dem des missachtenden Verhaltens entspricht oder dem vorgeschriebenen.

Für die Bewertung werden sowohl die Weglänge als auch die mittlere Distanz zwischen Test-Route und Entscheidungs-Routen untersucht. Im innerstädtischen Bereich kann es vorkommen, dass aufgrund der Manhattan-Distanz erlaubte und verbotene Fahrwege die gleiche Länge haben. In diesem Fall ist die Identifizierung der Test-Route mit dem mittleren Abstand anzuwenden. Diese Methode versagt jedoch, wenn wie im Fall der Abbildung 3.7 die zusätzliche Fläche sich annähernd auf 0 verkleinert. Dann ist die Auswertung über die Länge zu wählen.

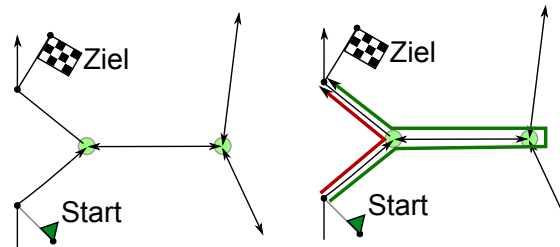


Abbildung 3.7: Abbiegeverbot Erkennung

3.5 Genauigkeit der Straßenattribute

Straßenattribute sind alle Informationen, die auf einem Weg oder einer Straße gelten. Zu den hier vorrangig untersuchten gehören Geschwindigkeitsbeschränkung, Spuranzahl und Straßennamen. Das im Folgenden eingeführte Bewertungsverfahren kann auf diese und auf weitere Werte angewendet werden.

3.5.1 Abbildung

Die Bewertung findet anhand einer Kartenüberlagerung statt. Dazu werden mit einem Matching-Algorithmus (siehe Kapitel 4.6.1) Straßen gefunden, die in beiden Karten das selbe reale Objekt darstellen. Diese werden als „Paare“ bezeichnet. Da sich die Eigenschaften für Verkehrsteilnehmer nach ihrer Bewegungsrichtung auf einer Straße unterscheiden können, werden die Richtungsfahrbahnen getrennt voneinander untersucht. Die durch diese Aufschlüsselung entstehende Struktur des Netzes gleicht einem Navigationsgraphen, in dem jede Straße durch zwei Kanten (in Hin- und Rückrichtung) dargestellt sind. Für jede Richtungsfahrbahn wird daher auch die Bezeichnung „Kante“ genutzt, wobei in diesem Fall eine solche Kante für einen Streckenabschnitt mit identischen Attributen steht.

Bei der Durchführung einer Überlagerung besteht die Problematik, dass ein Ergebnis in der Regel bei einem Wechsel von Referenz- und Testkarte (Gegenprobe) nicht identisch ist. Sind in der Referenz deutlich weniger Straßen enthalten, kann die Testkarte womöglich eine sehr gute Abbildung der Referenz sein. Die Information, dass die Testkarte eine viel größere Kartenmenge besitzt, wird jedoch nicht erfasst.

Eine weitere Problematik ergibt sich aus der unterschiedlichen Geometrie der Kantenpaare.

Wenn sich entlang einer Straße ein Attribut ändert, kann dies in den zwei Karten an unterschiedlichen Positionen geschehen. Ergibt eine 1:N Kantenpaarung eine totale Übereinstimmung, muss dies im Umgekehrten Fall mit einer der N Kanten nicht ebenfalls zutreffen (siehe Abbildung 3.8). Eine Paarung wird ausgehend von einer Kante der Referenzkarte erstellt. Das Ergebnis

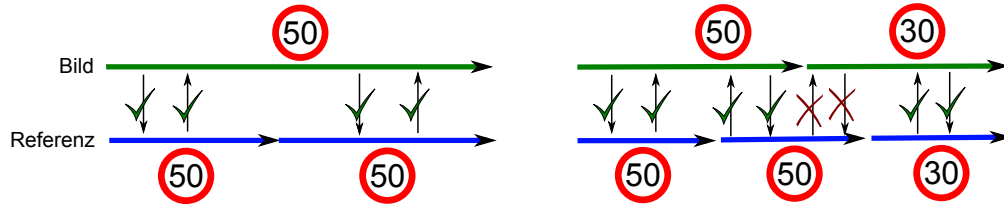


Abbildung 3.8: **Attribute bei M:N Kanten:** 1:N mit identischer Rückprojektion (links), N:M mit Überschneidung und ändernden Attributen (rechts)

ist die Abbildung durch eine oder mehrere Kanten aus der Testkarte. Wenn diverse Kanten als Abbilder zur Verfügung stehen, ist eine einzelne Kante als beste Abbildung für die Attributvergleiche auszuwählen. Alternativ fließen die Ergebnisse aller gefundenen Kanten in das Ergebnis ein.

Beste Abbildung

Die Auswahl der besten Abbildung erfolgt nach der längsten gemeinsamen Länge. So wird sichergestellt, dass kein unbedeutender Straßenabschnitt für den Vergleich ausgewählt ist. Bei diesem Vorgehen werden einige Kanten nicht berücksichtigt. Dies führt zu anderen Ergebnissen bei der Gegenprobe.

Gewichtete Abbildung

Mit einer Einbeziehung aller Kanten, welche eine Referenzkante abbilden, ist es möglich eine symmetrische Bewertung für den gemeinsamen Anteil der Straßenkarten zu erstellen. Die Testkanten werden dazu an ihrem Anteil an der Länge der Referenzkante gewichtet.

Die Bewertung des Vergleichs kann nach Netzlänge oder Straßenanzahl bestimmt werden. Im ersten Fall ist die Gewichtung die Länge der Testkante. Für die Aufstellung nach der Anzahl wird die Testkante nach ihrem Längenanteil an der Abbildung der Referenzkante im Intervall $[0,1]$ gewichtet.

Zur Identifizierung des Unterschieds werden für jedes Kantenpaar ihre Vorkommensfälle und die Übereinstimmung untersucht (siehe Abbildung 3.9). Die Tabelle 3.2 ist die Einordnungstabelle, in der die identischen, abweichenden und fehlenden Werte eingeordnet werden.

Mit den erhobenen Informationen werden aussagekräftige Faktoren bestimmt, die für sich genommen oder in der weiteren Anwendung Hinweise auf die Qualität des Datenmaterials geben.

3.5.2 Kennzahlen

Eine Reihe von Aussagen über die Qualität und Quantität eines Attributs lassen sich über die Kombination der in Tabelle 3.2 gesammelten Werte treffen. Zunächst wird gegenübergestellt, in

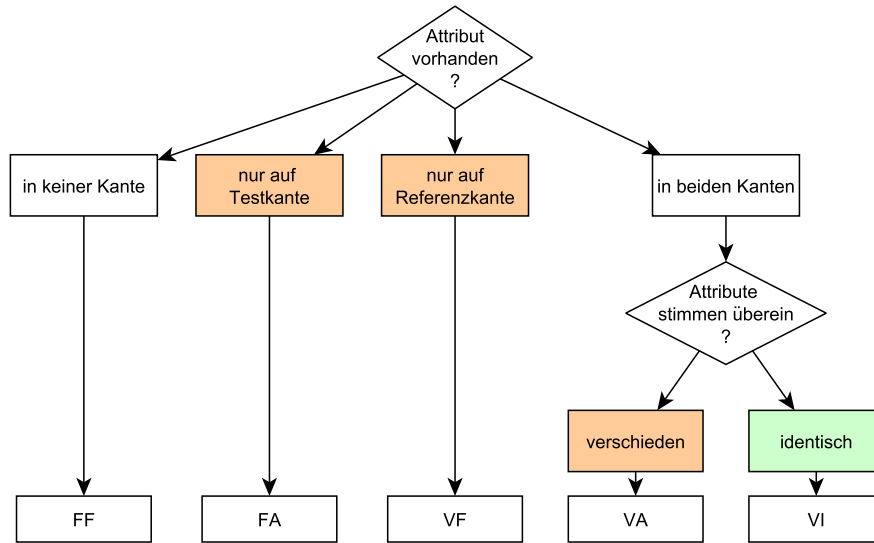


Abbildung 3.9: Einteilung eines Kantenpaares

in Abbildung↓	ref. Wert vorhanden	ref. Wert fehlend
identisch	VI	$(=FF)$
abweichend	VA	FA
fehlend	VF	FF

Tabelle 3.2: Einteilung der Attribute der Teilkanten

welchem Ausmaß ein Attribut in den Wegen auftritt.

Die *Eigenabdeckung* (Masking) jedes Netzes gibt an, auf welchem Anteil ein Attribut mit einem Wert angegeben wird. Für die spätere Auswahl ist eine deutliche Gegenüberstellung der Daten nötig. Da sich die Referenzmengen für die zwei Karten durch die N:M Treffer beim Matching unterscheiden, wird nur die Testkarte als solche verwendet. Die Eigenabdeckung wird je Netz nach einer eigenen Formel berechnet.

$$\begin{aligned}
 \text{Eigenabdeckung Referenzkarte} \quad m_{ref} &:= \frac{VI + VA + FA}{VI + VA + VF + FA + FF} \\
 \text{Eigenabdeckung Testkarte} \quad m_{test} &:= \frac{VI + VA + VF}{VI + VA + VF + FA + FF}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Über die Gegenüberstellung der Eigenabdeckung wird ein erster Eindruck über die Vollständigkeit der Daten ermöglicht. Diese stellt jedoch keinen Zusammenhang zwischen den Karten her. Mit der *Überlagerung* (Overlay) wird der Anteil bezeichnet, der sowohl in der Referenz-, als auch in der Testkarte mit Werten versehen ist. Attribute, die nicht auf allen Kanten benötigt werden, sind auf den Lücken nicht zu berücksichtigen. Daher wird nur der Anteil der gesetzten

Informationen im Nenner verwendet.

$$\text{Überlagerung } o := \frac{VI + VA}{VI + VA + VF} \quad (3.20)$$

Die *Gleichheit* (Equality) der Informationen umfasst alle Kanten mit identischen Werten und solche, bei denen auf Referenz und Test (Abbild) jeweils keine Informationen vorliegen.

$$\text{Gleichheit } e := \frac{VI + FF}{VI + VA + VF + FA + FF} \quad (3.21)$$

Die *Übereinstimmung* wird als Schnittmenge aus der Qualität der Überlagerung und der gleichen Wertigkeit der Attribute gebildet. Dabei kommt der DICE-Score[21] zum Einsatz, welcher den Grad der Übereinstimmung normalisiert.

$$\text{Score } C_D := \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \quad (3.22)$$

$$\text{Übereinstimmung } f := \frac{2 \cdot o \cdot e}{o + e} \quad (3.23)$$

Der Score entspricht dem Maß zur Beurteilung der Genauigkeit und Sensitivität von stochastischen Tests und liefert einen Wert zwischen 0 (schlechte) und 1 (gute Übereinstimmung). Er ist daher gut für eine qualitative Einordnung geeignet.

Besitzt die Testkarte mehr Kanten mit Informationen als diese in der Referenzkarte vorkommen (*FA*) so wird diese Eigenschaft nicht berücksichtigt. Eine Erkennung dieses Umstands erfolgt nicht, da nur das Erreichen der Referenzkartenqualität untersucht wird, jedoch nicht ein Übersteigen. Für diesen Fall ist ein Wechsel von Test- und Referenzkarte im Matching nötig (Gegenprobe).

3.5.3 Konflikte

Ein wichtiger Punkt ist die Erkennung von Konflikten in den Daten. In den Funktionen für Überlagerung und Gleichheit wird nicht berücksichtigt, zu welchem Anteil sich in beiden Karten vorhandene Werte widersprechen. Der Konflikt kann ausgedrückt werden über die Formel 3.24.

$$\text{Konflikt } c := \frac{VA}{VI + VA + VF} \quad (3.24)$$

Dieser Wert gibt an, zu welchem Anteil die von der Testkarte zur Verfügung gestellten Informationen den Referenzwerten widersprechen. Im Testnetz nicht vorhandene Attribute werden ignoriert.

3.5.4 Referenzwert

Die Bewertung über die Tabelle 3.2 bezieht keine quantitativen Aspekte der abweichenden Attribute ein. Es werden lediglich die Kantenlängen, nicht jedoch die Differenz der Attributwerte

berücksichtigt. Für eine Quantifizierung wird zusätzlich eine Abstandsfunktion eingeführt, welche Geometrie und Attribute berücksichtigt.

$$D_a = \sum_k \frac{g_a \cdot L_k}{L_{ref}} \quad (3.25)$$

Dabei ist D_a die Distanzfunktion für die gesamte Referenzkante und g_a die Abstandsfunktion des Attributs a auf der Ebenbild-Kante k . Unter der Annahme, dass die zu vergleichenden Daten jeweils fehlerhaft sind, kann keine Abweichung vom Referenzwert, sondern lediglich eine Differenz bestimmt werden.

$$g_a = \frac{a_{ref} - a_k}{a_{real} \rightarrow \text{unbekannt}} \quad \text{nicht möglich} \quad (3.26)$$

Die Bildung eines Verhältnisses zwischen den zwei abweichenden Werten geschieht so, dass bei einer Umkehrung der identische Wert berechnet wird. Eine Möglichkeit ist die Nutzung des größten Wertes aller Kanten (e_0, e_1) in beiden Karten als Referenzwert.

$$g_a = \frac{|a_{ref} - a_k|}{\max_{e \in \{E_{ref}, E_k\}} (a_e)} \quad (3.27)$$

$$\text{bspw. } g_{speed} = \frac{|v_{ref} - v_k|}{130 \text{ km/h}}$$

Eine globaler Referenzwert, der für alle Kanten gleichermaßen gilt bewirkt, dass die Unterschiede bei Attributen mit einem hohen Zahlenwert unterschiedlich stark gewichtet werden. Beispielsweise führt dies bei Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Straßen mit niedrigeren Werten zu einer schwächeren Berücksichtigung der Abweichung. Bestehen in einer Ortschaft durch Fehler die Einträge 50 km/h und 30 km/h, so ist der Wert von $g = \frac{20}{130} = 0,15$ obwohl der reale Fehler bei $\frac{20}{50} = 0,4$ bzw. $0,6$ liegt. Damit die Gewichtung auf allen Straßen gleichermaßen berücksichtigt ist, wird das lokale Maximum je Kante als Referenz angenommen.

$$g_a = \frac{|a_{ref} - a_k|}{\max(a_{ref} - a_k)} \quad (3.28)$$

$$\text{bspw. } g_{speed} = \frac{|30 - 50|}{50} = \frac{|50 - 30|}{50} \quad (3.29)$$

Sonderfall: Straßennamen

Für den Vergleich von Kartenmaterial wird häufig die Anzahl der vorhandenen Straßennamen betrachtet. Sie ist für die „Position zu Position“ Routensuche nicht zwingend nötig. Die Informationen sind jedoch für die Orientierung wichtig und wurden in der Vergangenheit bereits für Karten-Vergleiche herangezogen.

Es gibt für jeden Weg zwei Arten von Namen. Der globale Name (z.B. „L190“) bleibt über eine lange Strecke bestehen und kennzeichnet die Zuständigkeit der Straßenmeisterei. Der lokale Name (z.B. „Frankfurter Ring“) gibt den geläufigen, meist historischen Straßennamen an. Während des Vergleichs ist zu beachten, dass nicht jeder Weg immer beide Namen besitzt.

Da es sich bei Namen nicht um einen Zahlenwert handelt, erfolgt die Bildung eines Ergebnisses anhand des Namensvergleichs. Die genaue Übereinstimmung des Namens ergibt einen Differenzwert von 0. Bei einem negativen Vergleich oder dem Fehlen des Namens bei einer der Straßen erhält diese den Wert 1.

3.6 Bewertungsablauf

Ein Großteil der Bewertungsverfahren erfolgt auf gemeinsamen Grundlagen. In Abbildung 3.10 ist der Zusammenhang und Ablauf dargestellt.

Die Straßennetzlänge wird direkt aus den Rohdaten der Referenz und Testkarte berechnet. Die Menge der überlagerten Straßen wird mit einem Matching-Verfahren festgestellt. Als Eingabedaten hierfür können die Rohdaten dienen. Die Qualität der Matching-Ergebnisse ist mit einer Vorfilterung besser, nach der nur noch öffentliche Straßen vorhanden sind. Als Ergebnis der Überlagerung entstehen drei Wegmengen. Aus der gemeinsamen und den Exklusiv-Mengen wird der Überschuss berechnet, der Aufschluss über den erweiterten Informationsgehalt und die Detailtiefe einer Straßenkarte gibt.

Mit der Menge der gemeinsamen Wege werden außerdem die Vollständigkeit der Abbildung von Abbiegerelationen geprüft und die Qualität und Quantität der Straßenattribute bestimmt.

Für die Prüfung der Tauglichkeit als Netzgrundlage für Simulationen werden die Karten in ein Simulationsformat konvertiert und auf diesen eine Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Über die Zwischenergebnisse werden anschließend die Ähnlichkeiten der Reisewege und Reisezeiten bestimmt.

Bevor dieses Vorgehen praktisch umgesetzt wird, werden die zu verwendenden Technologien im folgenden Kapitel ausführlich vorgestellt und diskutiert.

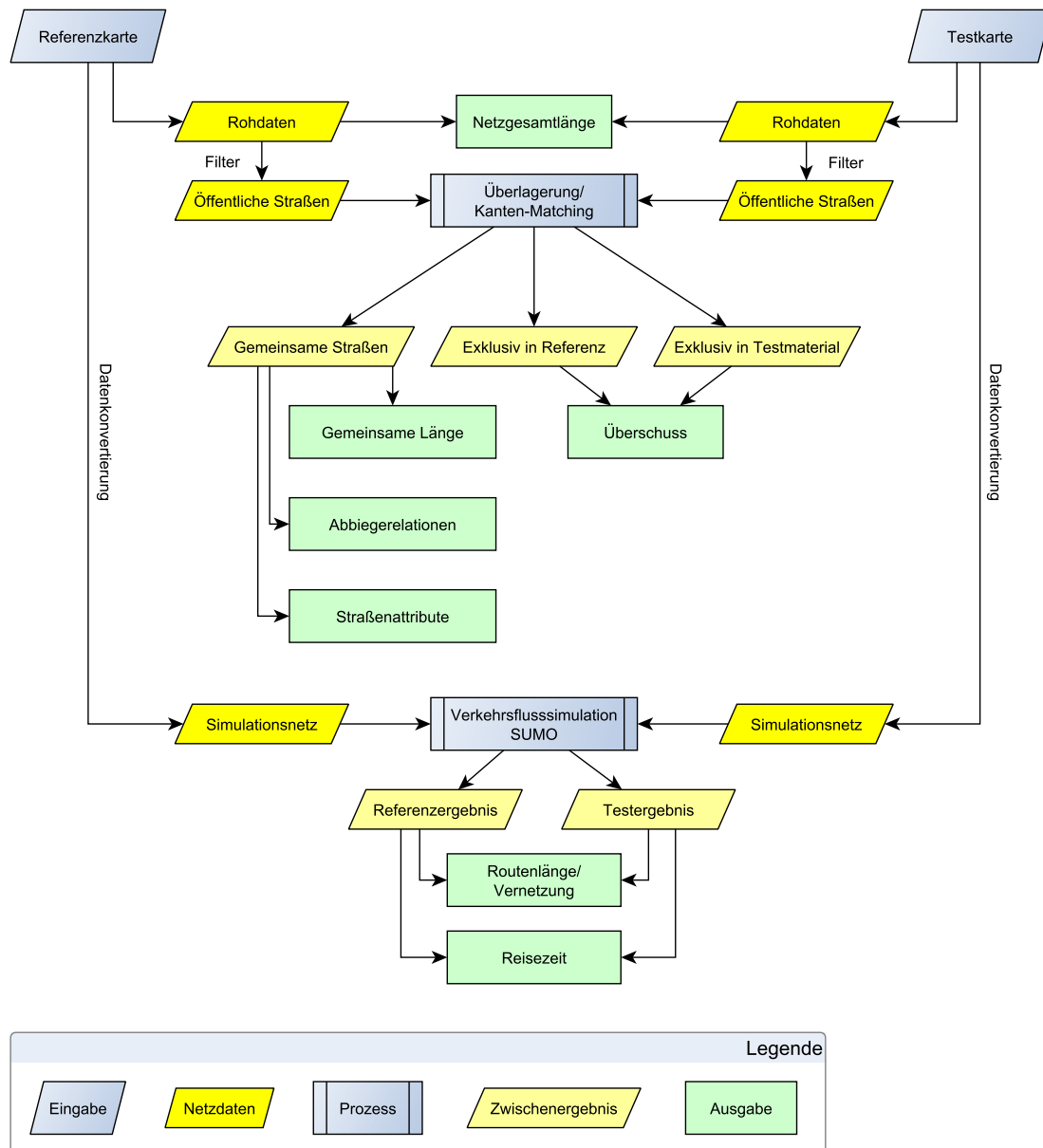


Abbildung 3.10: Ablauf der Bewertung

4 Verwendete Technologie

Die vorgestellten Methoden werden an Beispielen demonstriert. Eine Vorstellung der verwendeten Technologien zeigt die Möglichkeiten zur Umsetzung der Bewertungsmetrik.

Als Grundlage des Kartenmaterials dienen digitale Straßenkarten von NAVTEQ und OpenStreetMap. Beide sind unterschiedlich aufgebaut und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Datenangebotes. Nach der Einführung der Datenstrukturen wird die Verwendung eines Straßen-Matchings-Verfahrens ab Seite [44](#) diskutiert.

4.1 Straßenkarte NAVTEQ - HERE

Das am DLR verwendete Kartenmaterial wird von der Firma NAVTEQ bezogen. Diese gehört seit 2008 zum Konzern Nokia. Die Sparte Kartenmaterial wird seit 2012 unter dem Namen HERE betrieben [\[5\]](#).

4.1.1 Datenstruktur

Das Kartenmaterial wird im weit verbreiteten Geographic Data Files - Format (GDF) geliefert [\[1\]](#). Ein besonderer Vorteil des Formats besteht in der Gliederung der Daten in drei Abstraktionsebenen. Das Material lässt sich wie folgt gliedern:

- **Ebene 0** Geometrie
- **Ebene 1** Einfache Informationen
- **Ebene 2** Komplexe Informationen

Auf der Geometrieebene werden Geraden und Punkte genutzt, um die Lage einer Straße darstellen zu können.

Für das Routing werden Informationen aus der Ebene 1 verwendet. Straßen sind an Knotenpunkten miteinander vernetzt.

Komplexe Gebilde können aus einer Vielzahl von Knoten, Linien und primitiver Geometrien bestehen.

4.1.2 Eigenschaften der Straßen

Straßen werden als „Road Element“ Bausteine abgebildet. Am Anfang und Ende jedes Elements befindet sich jeweils ein Knotenpunkt („Junction“). Die Hin- und Rückrichtung wird in einem Element zusammengefasst, solange der Abstand unerheblich ist und die geltenden Attribute für beide Richtungen identisch sind.

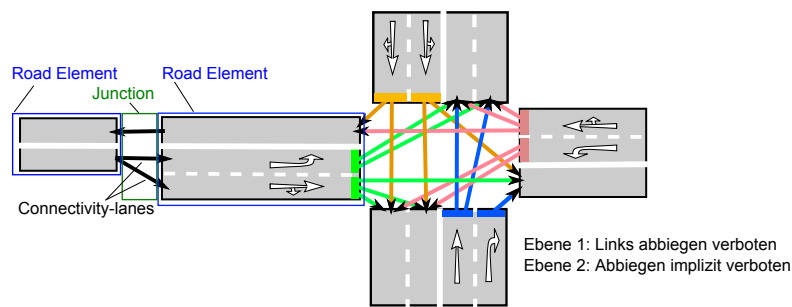


Abbildung 4.1: Aufbau der NAVTEQ Karte in der Ebene 2

Die Informationen, die auf den Wegen gelten, sind sehr detailliert. Es ist insbesondere möglich, besondere Attribute wie die Spuranzahl auf bestimmten Abschnitten der Straße zu positionieren (z.B. Tempolimit 120 km/h nur von km 1,7 bis 4,3).

Die NAVTEQ Karte liefert in der vorliegenden Version folgende verwertbaren Attribute:

- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Spuranzahl
- Spuraufweitungen
- Abbiegebeziehungen
- Spurbeschränkungen

Bei der Unterteilung der Straßenkategorie verwendet die NAVTEQ-Karte fünf Stufen. Jede Stufe stellt ein eigenes Erreichbarkeits-Netz dar. Diese werden von 0 bis 4 in die Prioritäten „hoch“ bis „niedrig“ eingeteilt. Die Klassen der jeweils enthaltenen Straßen sind dabei nicht entscheidend. In Gebieten mit niedriger Straßendichte können auch einfache Landstraßen in die höchste Kategorie gezählt werden, in der sonst lediglich Autobahnen enthalten sind, da sie die Erreichbarkeit von peripheren Ortschaften ermöglichen.

4.1.3 Abbiegebeziehungen

Auf der Navigationsebene kommen „Untersagte Manöver“ (Prohibited Manoeuvre) zum Einsatz. Diese geben an, welche Abbiegebeziehungen explizit nicht erlaubt sind.

Auf der höchsten Detailebene ist eingetragen, welche Spuren an Knotenpunkten miteinander verknüpft sind (Lane Connectivity) (siehe Abbildung 4.1). Über diese sind alle möglichen Fahrtbeziehungen bestimmt und Abbiegeverbote können implizit ermittelt werden. Diese Funktion ist ein erst junger Bestandteil in den Daten, weswegen erst ein kleiner Teil der Knotenpunkte mit dieser sehr genauen Richtungsangabe ausgestattet ist.

4.1.4 Informationen für Einsatzkräfte

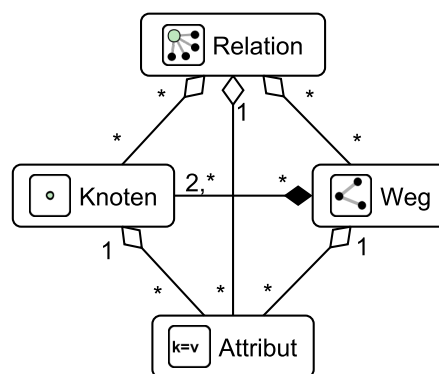
Auf mobilen Navigationsgeräten werden besondere Orientierungspunkte, markante Orte, Geschäfte und öffentliche Gebäude dargestellt. Diese *Points of Interest (POIs)* sind in den NAVTEQ Daten enthalten und können für Rettungskräfte wichtige Standortinformationen liefern. Krankenhäuser, Ärzte und Apotheken sind als einzelne Koordinaten verzeichnet. Für große Gebiete, wie Wälder oder Bahnanlagen liegen die Ausdehnungen als Polygone bereit. Als Orientierungshilfe sind für jede Straße sowohl die Postleitzahl als auch Orientierung und Position der Hausnummern angegeben.

4.2 Straßenkarte OpenStreetMap

Das digitale Kartenmaterial der OpenStreetMap (OSM) wird durch die OpenStreetMap Foundation zur Verfügung gestellt. Alle Daten können von jeder Person eingesehen und bearbeitet werden. Die Verwendung aller Daten findet unter der Open Database License (ODbL)[18] und der Creative Common License (CC BY-SA 2.0)[6] statt. Die Verwendung des Materials ist damit kostenfrei möglich, wenn das daraus erstellte Produkt ebenfalls unter der gleichen Lizenz veröffentlicht wird.

4.2.1 Datenstruktur

Das Datenformat kommt mit den drei Datenstrukturen **Knoten** (Node), **Wege** (Way, geordnete Liste von Knoten) und **Relation** (Relation) aus (siehe Abbildung 4.2). Eine Fläche ist ein geschlossener Weg. Relationen stellen Beziehungen der Objekte untereinander her.



Quelle (Icons):[19]

Abbildung 4.2: Datenstruktur der OpenStreetMap

Jeder der drei Typen kann weitere Informationen in Form von Attributen besitzen. Diese werden als Schlüssel-Wert-Paare, sogenannte *Tags*, bezeichnet. Schlüssel und Wert sind jeweils Zeichenketten. Ihre Schreibweise oder Verwendung ist nicht limitiert. Es gibt lediglich Konventionen, an denen sich die Beteiligten orientieren.

Knoten besitzen Koordinaten im Worlds Geodetic System (WGS 84) und beliebig viele Tags.
Wege besitzen beliebig viele Knoten und beliebig viele Tags.
Relationen besitzen beliebig viele Knoten und/oder Wege und beliebig viele Tags.

Wege beschreiben alle linienförmigen Geometrien und Flächen. Sie bestehen mindestens aus zwei Knoten. Im Folgenden werden nur solche Wege behandelt, auf denen Verkehr möglich ist.

4.2.2 Aktualität

Durch den kostenlosen und einfach gehaltenen Zugriff wird die Datenbank von den vielen Mitwirkenden (weltweit 1,79 Mio. ⁷) ständig bearbeitet. Die Qualitätssicherung wird durch die Mitarbeit der vielen Freiwilligen (Mapper) betrieben. Schäden, welche durch die Unachtsamkeit neuer Mitglieder oder böswilliges Handeln entstehen, werden durch eigens entwickelte Werkzeuge erkannt und können rückgängig gemacht werden. Jeder Bearbeitungsschritt bewirkt in der Datenbank die Aktualisierung des Zeitstempels der letzten Bearbeitung eines Objektes. Eine Übersicht über den Verlauf der Aktualisierung für alle Objekte ist in den Graphen für die Verwaltungsgebiete, Braunschweig, Region Hannover, Berlin, Landkreis Fulda und Landkreis Rostock (Abbildung 4.3 auf Seite 29) zu sehen. Die Zeitstempel geben keinen Hinweis, ob das Objekt erstellt oder nur bearbeitet wurde. Dennoch ist aus den Zahlen zu erkennen, dass sich die Karte in den vergangenen drei Jahren rasant verändert hat. Mehr als 50% der Knoten, die für die Darstellung und Verknüpfung von Wegen verantwortlich sind wurden nach dem Jahr 2011 (Ausnahme Landkreis Rostock: Dort nur 36%) modifiziert. In einigen Regionen sind Anzeichen für den Rückgang der Arbeiten an Knoten zu erahnen, die abflachenden Kurven in 2014 sind möglicherweise auch dem Umstand geschuldet, dass die Aufnahmen von Mitte September 2014 stammen und noch weitere Beiträge im Laufe des Jahres hinzukommen werden. Eine Hochrechnung ist nicht möglich. Eine Übersicht über die Bearbeitungshistorie divergieren zwischen den Städten, Monaten und Jahren.

Einen ähnlichen Bearbeitungsstand weisen die Wege auf. Bei diesen ist es wahrscheinlich, dass sie nicht neu erzeugt, sondern lediglich Attribute hinzugefügt oder verändert wurden. Trotzdem ist auch dies ein Anzeichen für die sich erhöhende Qualität der Daten, da geänderte Informationen über Fahrspuren und Geschwindigkeiten wichtig für die Nutzbarkeit des Kartenmaterials sind.

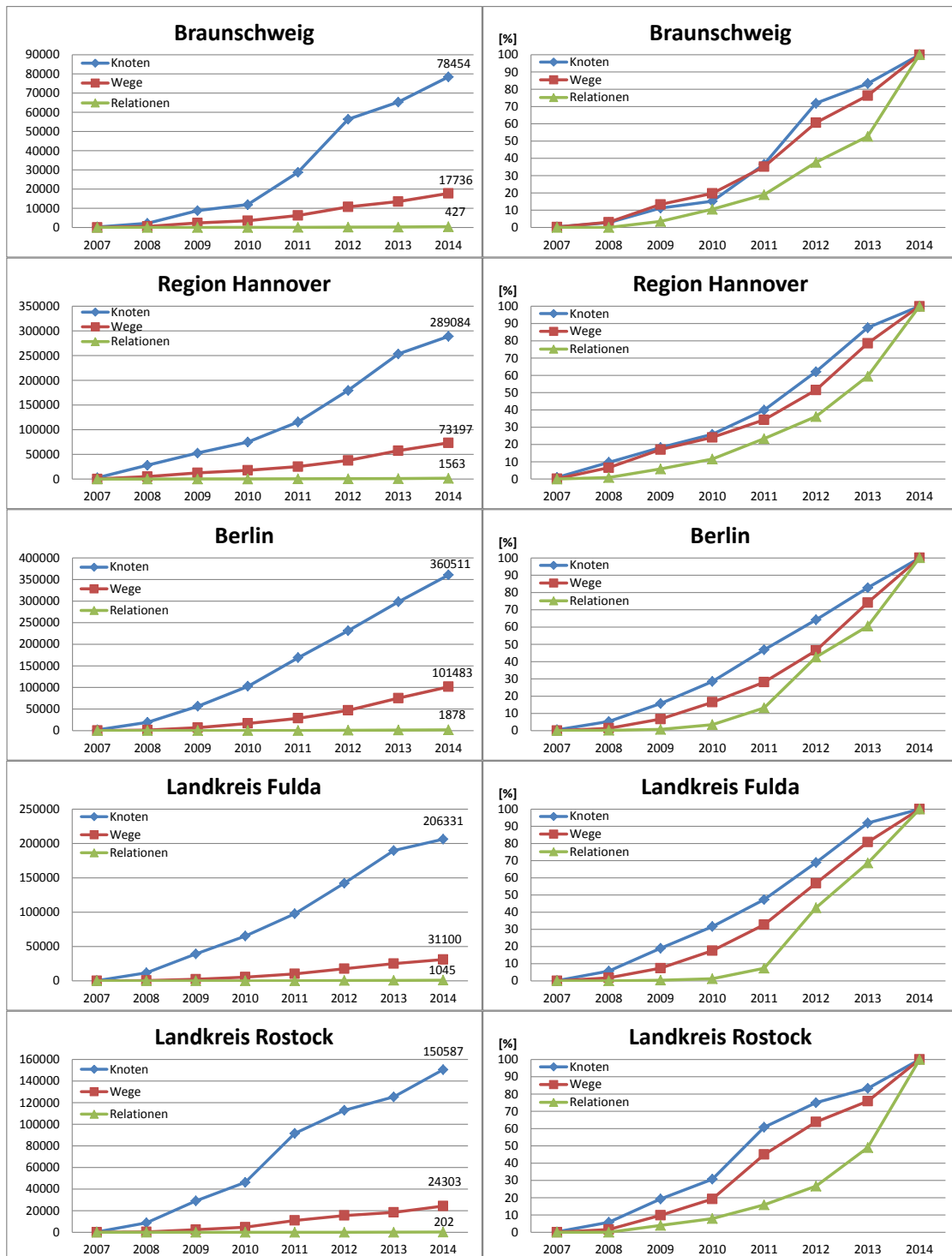
Relationen sind für das Routing von großer Bedeutung, da in ihnen die Abbiegevorschriften eingetragen sind. Bei diesen setzte die Entwicklung erst nach 2011 ein. Mehr als 80% der Änderungen sind jünger als drei Jahre.

Die Entwicklung zeigt, dass die OpenStreetMap erst seit kurzer Zeit mehr ist als das Bild einer Straßenkarte. Die Voraussetzung für den Einsatz als Navigationsgraph für die computergestützte Routensuche waren vor 2011 nicht erfüllt [14].

4.2.3 Eigenschaften der Straßen

Wege, die für den Verkehr vorgesehen sind und daher für die Navigation von Relevanz sind, besitzen einen sogenannten „Highway“-Schlüssel. Der zugehörige Wert steht für die Straßen-

⁷<http://osmstats.altogetherlost.com/>[19.09.2014]



Auszüge aus der OSM-Datenbank, Stand 19.09.2014

Abbildung 4.3: Letzte Änderungen in OpenStreetMap Regionen

klasse, die beschrieben wird. Es treten hauptsächlich die in Tabelle 4.1 beschriebenen Werte für Kraftfahrzeugstraßen auf⁸. Daneben bestehen Verbindungsstraßen in einer Straßenklasse, wie zum Beispiel „motorway_link“ für die Verbindungen der Hauptfahrbahnen an Autobahnkreuzen.

Verkehrswege für den nicht motorisierten Verkehr werden ebenfalls mit dem Schlüssel „Highway“ gekennzeichnet. Es gibt neben den Fußgängern (pedestrians/footway), Radfahrern (cycleway) auch noch weitere Klassifizierungen, auf denen teilweise die erlaubte Nutzungsart nicht eindeutig geregelt ist. Daher können an jeden Weg zusätzlich besondere Zugangsbeschränkungen hinzugefügt werden.

Ein Beispiel für den Aufbau eines Weges ist in Tabelle 4.2 gezeigt.

OpenStreetMap	Deutsche Entsprechung
motorway	Autobahn
trunk	z.T. Kraftfahrstraße bzw. Autostraße
primary	Bundesstraße
secondary	Landstraße
tertiary	Kreisstraße
unclassified	Gemeindestraßen
residential	Wohnstraßen
living_street	verkehrsberuhigter Bereich

Tabelle 4.1: Straßenklassen in OpenStreetMap geordnet nach absteigender Priorität

Wege sind eine geordnete Liste von Knoten und besitzen daher eine Richtung. Das Befahren eines Weges ist grundsätzlich in beiden Richtungen möglich, wenn keine Einschränkung durch einen Einbahnstraßen-Tag („oneway = true“) vorliegt.

⁸<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:highway>[15.09.2014]

OpenStreetMap	Deutsche Entsprechung
highway = residential	Wohnstraße
oneway = true	Einbahnstraße
oneway:bicycle = no	Gegenverkehr für Fahrräder erlaubt
access:hgv = no	Verbot für LKW mit Gewicht über 3,5t
lanes = 2	2 Fahrspuren
max_speed = 50	Höchstgeschwindigkeit 50 km/h

Tabelle 4.2: Beispielformat eines OpenStreetMap-Weges

Alle Attribute eines Weges sind für die gesamte Länge gültig. Ändert sich ein Attribut (z.B. die Anzahl der Spuren), wird ein neues Weg-Objekt mit eigenen Eigenschaften definiert.

4.2.4 Abbiegebeziehungen

Eine Abbiegevorschrift wird als eine Relation angegeben. Ausgehend von einem Startweg wird eine Route über beliebige Knoten oder Wege zu einem Ziel definiert und mit einem entsprechenden Schlüssel gekennzeichnet, welcher die Art der Einschränkung angibt. Es gibt die Möglichkeit der „no“-Relation, bei welcher nur der beschriebene Pfad nicht genutzt werden darf, und die „only“-Relation, welche implizit das Verwenden aller anderen Verbindungen untersagt.

Die Definition von Abbiegerelationen ist für die Erstellung des Navigationsgraphen eine wichtige Information. Sie reicht jedoch nicht aus, um die genaue Anzahl an Abbiegespuren und den Aufbau eines Knotenpunktes festzustellen.

4.2.5 Knotenpunkte

Verkehrsknotenpunkte sind in der OpenStreetMap daran zu erkennen, dass mehrere Wege einen gemeinsamen Knoten besitzen. Eine Schwierigkeit besteht bereits bei der Anzahl der Wege. Ein Knotenpunkt von zwei Straßen kann als Knoten jeweils innerhalb der Wege sein (muss nicht als Start- oder Endknoten definiert sein). Das bedeutet, dass an einem Kreuzungsknoten nicht unbedingt ein Weg endet oder beginnt. Umgekehrt heißt das Enden und Beginnen jeweils eines Weges an einem Knoten nicht, dass dort eine Verkehrskreuzung liegt. Es kann sich auch lediglich um den Wechsel eines Attributs auf einem Streckenabschnitt handeln, für den die Straße in mehrere Segmente (Wege-Objekte) geteilt wurde.

Lichtsignalanlagen

Lichtsignalanlagen werden mit einem Tag („highway = traffic_signals“) an Knoten gekennzeichnet. Die Verwendung richtet sich dabei nach der Komplexität des Knotenpunktes. An einfachen Knoten wird lediglich dem Verbindungsknoten der Tag zugewiesen. Aus diesem wird die Lage der Signalanlagen und Haltepositionen der Fahrzeuge abgeschätzt.

Bei größeren Bereichen werden die Knoten dort mit dem Tag versehen, an denen sich die Haltelinie befindet. Mitunter ist die Konvention jedoch nicht eindeutig, sodass im Kreuzungsbereich weitere Signale eingetragen sind. Dies ist meist kreuzenden Fuß- oder Radwegen geschuldet. Informationen über die Schaltzeiten der Verkehrsströme sind nicht in der OpenStreetMap enthalten. Es gibt jedoch Bestrebungen und verschiedene Vorschläge (Proposals), die benötigten Angaben für die Berechnung von Schaltphasen in das Datenmodell einzupflegen. Diese Ideen erweitern die benötigten Tags um ein Vielfaches, um beispielsweise Grüne-Welle-Assistenten (GLOSA)⁹ zu ermöglichen oder Verkehrsströme in höchsten Detailstufen simulieren zu können¹⁰. In beiden Fällen sind die Informationen unübersichtlich und für unerfahrene Mapper schwer zu verstehen. Hinzu kommt, dass die Phasen der Signalanlagen nicht grundsätzlich in einem Festzeitprogramm geschaltet werden, sondern nach Bedarf oder nach Tageszeitprogramm

⁹http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Proposed_features/GLOSA[21.09.2014]

¹⁰http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Proposed_features/Traffic_Signals[21.09.2014]

variieren.

Im Daten-Schema ist die Möglichkeit für zeitliche Einschränkungen gegeben¹¹, die Problematik der Unübersichtlichkeit bleibt jedoch bestehen.

Abbiegerspuren

Seit Anfang 2012 werden die Abbiegemöglichkeiten an den Enden von Wegen mit dem Tag-Schlüssel „turn:lanes=“ angegeben¹². Mit Angaben wie „scharf links“, „leicht rechts“ oder „geradeaus“ werden die erlaubten Richtungen auf jeder Abbiegerspur angegeben. Über diese Angabe wird die Anzahl der Fahrspuren, jedoch nicht die Länge der Spur angegeben. Diese Information ist für die Modellierung der Simulationsnetze wichtig, wenn es sich um eine Aufweitung der Hauptfahrbahn handelt. Für diese Information gibt es einen Vorschlag¹³, welcher bisher nicht angenommen ist und daher nicht eingesetzt wird.

Im Gegensatz zur Angabe der erlaubten oder verbotenen Abbiegebeziehungen werden für die Abbiegerspuren keine Referenzen auf die zu erreichenden Wege angegeben, sondern lediglich beschreibende Worte. Dies erleichtert die Modellierbarkeit von Knotenpunkten, da weitere Wege hinzugefügt oder entfernt werden können, ohne dass an der Richtung des Abbiegers Änderungen vorgenommen werden. Durch die lediglich grobe Einteilung der Richtungen ist es möglich, dass Fehlinterpretationen entstehen und vom Leser der Daten andere Fahrtbeziehungen ermöglicht werden, als dies vom Mapper gemeint war.

Spurangaben werden für das Ende und den Anfang des Weges entsprechend der Definitionsrichtung des Weges angegeben („turn:lanes:forward=“ & „turn:lanes:backward=“). Tritt der Fall ein, dass sich zwischen den Enden weitere Kreuzungspunkte mit anderen Wegen befinden, ist an diesen kein Wissen über die Abbiegespuren vorhanden. Sehr lange Wege mit vielen Knotenpunkten und lediglich einer einzelnen Spurangabe sollten in mehrere Segmente zerteilt werden, um die Modellierung der Kreuzungen zu ermöglichen.

4.2.6 Informationen für Einsatzkräfte

Durch die freie Wahl der Tags gibt es bereits eine Vielzahl von Informationen, die einen Mehrwert für Einsatzkräfte darstellen. Im Folgenden werden einige vorgestellt.

Hindernisse

Der Attribut-Schlüssel „barrier“ bezeichnet Hindernisse in der Karte¹⁴. Dieser ist in der Mehrzahl der Fälle einem Knoten zugeordnet, wodurch es möglich ist, dass ein Weg nur bis zur einer bestimmten Position genutzt werden kann. In einem Kartenausschnitt (siehe Abbildung 4.4) ist zu erkennen, dass sehr häufig Wege durch ein Hindernis blockiert werden. Es handelt sich dabei nur in den seltensten Fällen um tatsächliche Straßen. Poller und Schranken sind eingetragen, um anzuzeigen an welchen Orten der öffentliche Verkehr keine Durchfahrt-Rechte besitzt. Für Einsatzkräfte auf der Suche nach einem kürzesten Weg ist die Information nützlich, ob sich an

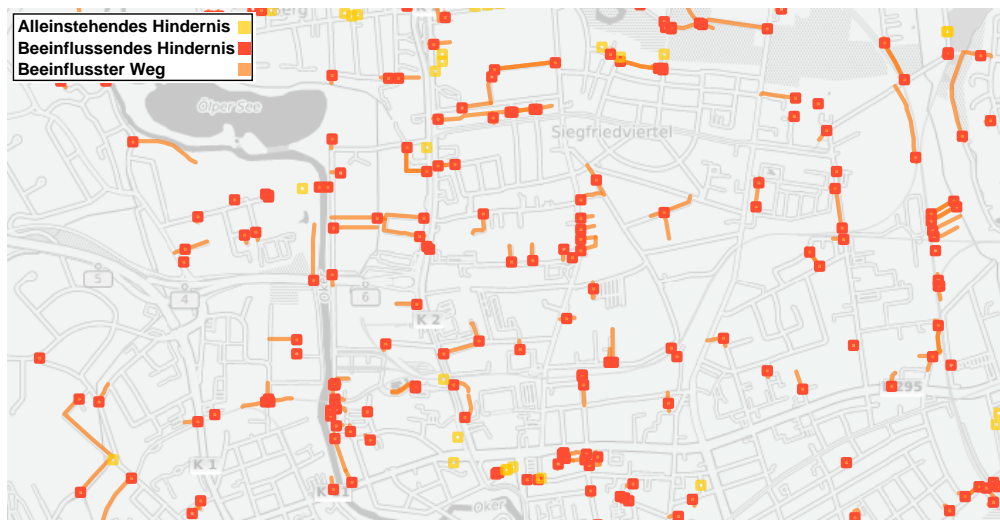
¹¹http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Conditional_restrictions[21.09.2014]

¹²<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:turn>[21.09.2014]

¹³http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Relations/Proposed/turn_lanes[20.09.2014]

¹⁴<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:barrier>[12.10.2014]

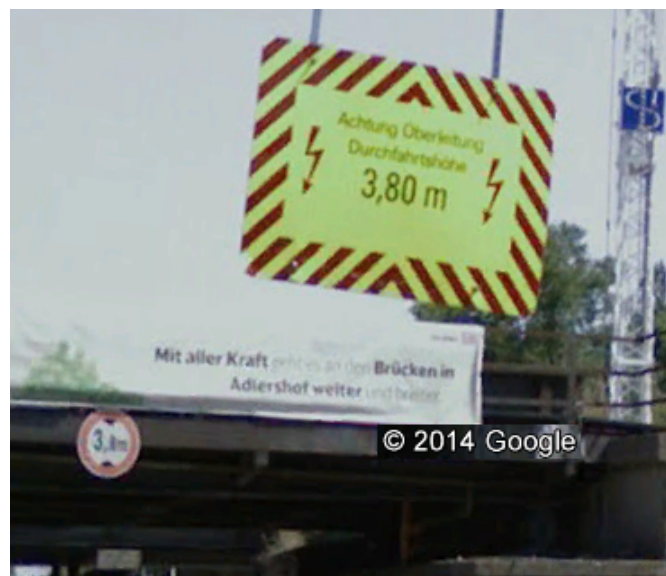
einer Durchfahrt ein Zaun oder ein Tor, eine Schranke oder keine, ein fester oder ein versenkbarer Poller befinden. Diese Informationen sind in der OpenStreetMap schon sehr weit verbreitet. Weitere Hindernisse für große oder schwere Einsatzfahrzeuge sind auf Wegen eingetragen. Spe-



Quelle (Straßenlayer): [23]

Abbildung 4.4: Hindernisse in OpenStreetMap

zielle Schlüssel geben die maximal zulässige Höhe, Breite, Länge, Gewicht oder Achslast vor. Die Höhe kann durch weitere Elemente der Umgebung, zum Beispiel durch niedrige Bäume oder Fahrdrabt/ Oberleitungen eingeschränkt sein. In der OpenStreetMap sind nicht nur straßenverkehrsbezogene Daten enthalten. Es können auch alle Umgebungsobjekte eingetragen sein, sodass es möglich ist implizit auf weitere Einschränkungen zu schließen.

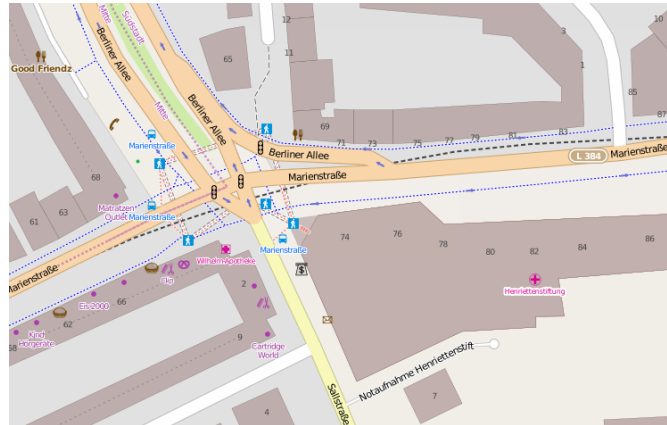


Quelle: Google Earth

Abbildung 4.5: Maximale Höhe durch Oberleitung

Adressen

Adressen werden über die Schlüssel „`addr:street`“ (Straßenname), „`addr:housenumber`“ (Hausnummer) und „`addr:postcode`“ (Postleitzahl) angegeben. Diese kommen an einzelnen Knoten zum Einsatz. Des weiteren ist es möglich, Hausnummern über den Straßenverlauf zu interpolieren¹⁵. Derzeit werden massive Datenportierungen aus öffentlichen Quellen angestrebt¹⁶. In Abbildung 4.6 ist der Detailgrad der Hausnummern zu erkennen.



Quelle: OpenStreetMap.org [16]

Abbildung 4.6: Ausschnitt OpenStreetMap

Hydranten und Wasserentnahme In der OpenStreetMap wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Möglichkeiten für die Löschwasserentnahme angegeben. In der standardmäßig angezeigten Karte (z.B. Standardlayer siehe Abbildung 4.6) sind diese Informationen nicht dargestellt. Spezielle Karten, wie die *OpenFireMap* [3] (weltweit) oder *OsmHydrant.org* (Österreich) zeigen den Lageplan von Feuerwachen, Hydranten, Löschteichen und vielem mehr. Zusätzlich zeigen sie die Bauarten und Anschlusstypen der Hydranten, soweit diese Attribute eingetragen sind (siehe Abbildung 4.7).

Angaben über die Existenz von Hydranten unterscheiden sich stark von Region zu Region. Vermutlich besteht ein starker Zusammenhang zwischen Detailgrad und dem Anteil der in OpenStreetMap mitwirkenden Mitgliedern der Feuerwehren (siehe Abbildung 4.8).

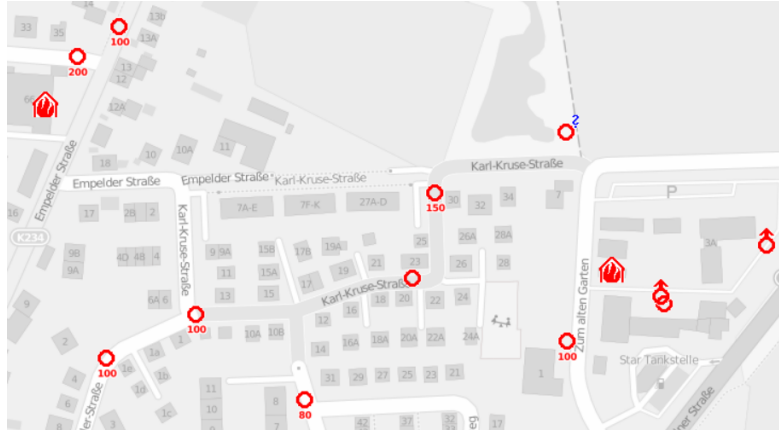
Zusammengefasst werden alle verfügbaren Informationen für Rettungseinsätze übersichtlich in einer Tabelle auf der „Einsatzkarte“¹⁷.

Insgesamt umfasst die OpenStreetMap eine riesige Fülle von Informationen. Ihr Detailgrad schwankt regional und die Menge an unterschiedlichen Attribut- Schlüsseln und Werten inklusive der auftretenden Rechtschreibfehler stellen eine Herausforderung für die Interpretation und Nutzung der Daten dar.

¹⁵<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Addresses>[12.10.2014]

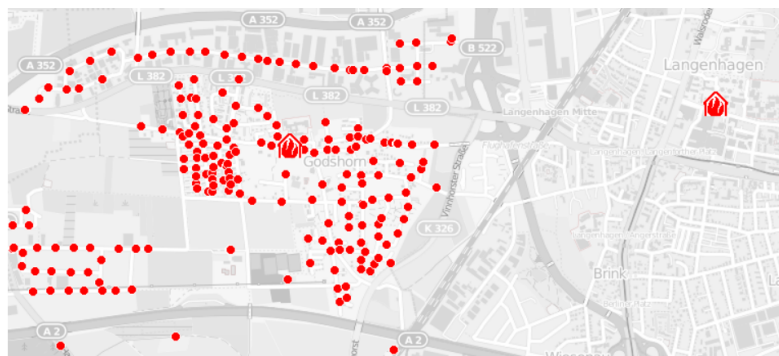
¹⁶<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Cologne/Adressimport>[12.10.2014]

¹⁷https://www.einsatzkarte.de/karteneintraege.html?cfs_forum_fmd=13&cfs_forum_forum=249[15.10.2014]



Quelle: OpenFireMap [3]

Abbildung 4.7: Löschwasserentnahmestellen in der OpenFireMap



Entnahmestellen und Feuerwachen

Quelle: OpenFireMap [3]

Abbildung 4.8: Kontrast der Detaildichte in der OpenFireMap

4.3 Datenstruktur für das Bewertungsverfahren

Für den Vergleich werden die unterschiedlichen digitalen Straßenkarten in ein gemeinsam genutztes Datenformat überführt. Auf diese Weise werden Konventionen eingehalten und Berechnungsfehler vermieden.

Es wird genutzt, um das Matching zu ermöglichen und die Untersuchung des Informationsgehalts durchzuführen. Dabei orientiert es sich an den genutzten Informationen und Strukturen der NAVTEQ Daten. Zum Verständnis der Konvertierung wird eine Übersicht über die Besonderheiten der Datenstruktur gegeben.

Koordinatensystem

Essentiell ist die Verwendung der gleichen Koordinatensysteme. Für die Bewertung von Längen und Flächen sind kartesische, metrische Koordinaten nötig. Die geographischen Koordinaten sind in Längen- und Breitengraden angegeben (EPSG:4326) und sind daher nicht für eine direkte Verwendung als Maß geeignet.

In dieser Arbeit wird für die Berechnung im metrischen Raum eine Transformation in das Referenzsystem EPSG:25832 verwendet, da sich in seinem Geltungsbereich die untersuchten Städte Braunschweig und Hannover befinden¹⁸. Für Gebiete östlich von Halle, ist EPSG:25833 anzuwenden¹⁹. Im Westen schließt sich ab Aachen der Bereich von EPSG:25831 an.

Funktionale Straßen Klasse - Functional Road Class

Das gemeinsame Datenformat nutzt eine Einteilung der Straßen in 8 Prioritäts-Kategorien, die sich wie bei der NAVTEQ Karte von 0=höchste bis 7=niedrigste einteilen.

Diese Abstufung erlaubt es wichtige von bedeutungslosen Wegen zu trennen. Dies ist für die Bewertung der Matching-Verfahren wichtig.

Obwohl die *Funktionale Straßen Klasse* (FRC) an das Konzept der Prioritäten-Netze der NAVTEQ Daten angelehnt ist, dessen Konzept nicht der Einteilung der OpenStreetMap Wege entspricht, wird eine Abbildung von den Highway-Tags auf die FRC unternommen.

Zur Erstellung wurden mit rein geometrischen Matching-Verfahren Wege aus der OSM auf die NAVTEQ Karte abgebildet und der jeweilige Anteil an Zuordnungen von Tags zu FRC in Tabelle 4.3 dargestellt. Da sich die Straßenklasse in den NAVTEQ Karten in lediglich 5 Stufen teilt, wurden diese in der Tabelle verwendet.

Eine Entsprechungstabelle, mit deren Hilfe eine einfache Konvertierung von OSM-Highway-Tags und NAVTEQ 5-Stufen FRC in die 8-Stufen der gemeinsamen Datenstruktur möglich ist, findet sich in Tabelle 4.4. Die Hierarchie der OpenStreetMap Wege ist dabei entsprechend der Empfehlung²⁰ der OpenStreetMap-Gemeinde eingeteilt.

Geographischer Ausschnitt

Für die Überprüfung von zwei Karten ist die Bereitstellung des exakt gleichen Kartenausschnitts wichtig. Die NAVTEQ Karte wird in Straßen-Pakete unterteilt, deren geographischer Umriss den

¹⁸http://www.lgn.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=11125&article_id=51708 [15.09.2014]

¹⁹<http://spatialreference.org/ref/epsg/25833/> [15.09.2014]

²⁰http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Highway_tag_usage [15.09.2014]

Highway-Tag	Straßenkategorie (FRC)				
	0	1	2	3	4
motorway	116	262	14	8	
motorway_link	65	204	16	110	
trunk		6	11		
trunk_link		1		9	
primary		48	11	284	
primary_link		12	5		
secondary	1	81	1	1082	42
tertiary		83		645	191
residential		2		1444	3258
living_street				112	60
service		2		375	752
NO TAG	51	389	28	7774	9370

Tabelle 4.3: Zuordnungstabelle von OSM Highway-Tag auf NAVTEQ Functional Road Class in Braunschweig

NAVTEQ FRC 0-4	Gemeinsam FRC 0-7	OpenStreetMap Highway-Tag
0	0	motorway, motorway_link
1	1	trunk, trunk_link
2	2	primary, primary_link
	3	secondary, secondary_link
3	4	tertiary, tertiary_link, unclassified
	5	residential
4	6	living_street, road
	7	service, track, cycleway, path, footway

Tabelle 4.4: Zuordnungstabelle von NAVTEQ und OSM

Verwaltungsbezirken entspricht (vergleiche hierzu auch Abbildung 5.1 auf Seite 53). Dieser ist komplex und nicht konvex, was die Verwendung von geographischen Berechnungsverfahren erschwert.

Die Daten aus dem Internetportal der OpenStreetMap werden standardmäßig in rechteckigen Ausschnitten (Boundingbox) exportiert. Mit erweiterten Tools wie der Overpass-API ist es möglich, nur Wege innerhalb eines Polygons (beispielsweise eines Verwaltungsbezirks) zu erhalten. Um auf einem Kartenpaar die Möglichkeit zu erhalten, viele, gesonderte Bereiche zu untersuchen, findet ein Zuschneiden des Kartenmaterials aus den Grunddaten lokal statt. Zur Definition wird ein Polygon verwendet, welches das auszuschneidende Gebiet beschreibt. Um quantitative Analysen, wie z.B. die Gesamtstraßenlänge zu ermitteln, ist ein exakt identischer Bereich aus beiden Karten erforderlich. Beim Schneiden von Straßen mit einem Ausschnittspolygon sind mehrere Fehlerquellen zu beachten und zu umgehen. In Abbildung 4.9 sind einige Verfahrens-

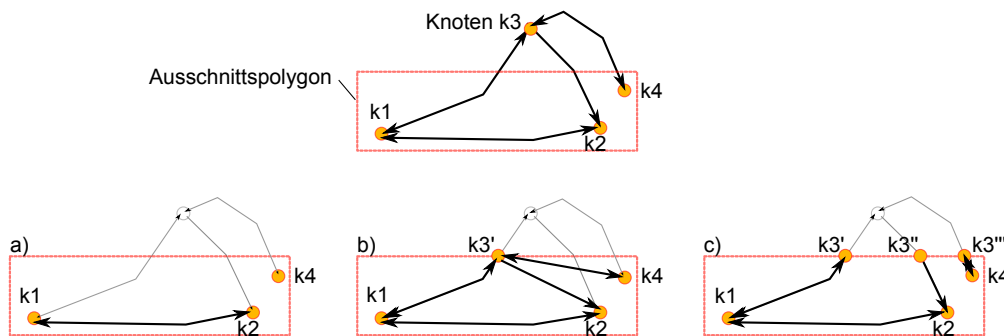


Abbildung 4.9: Polygonausschnitt: a) Löschung geschnittener Kanten b) Verschiebung von Knoten c) Duplizierung von Knoten

fehler dargestellt. Die komplette Löschung einer Kante, die sich mit dem Gebietspolygon schneidet (a) führt zu einer extremen Verkürzung der zu untersuchenden Wegemenge. Die Löschung von Punkten, die lediglich die Geometrie einer Straße außerhalb des Polygons beschreiben, kann eine falsche Länge suggerieren.

Ein abseits liegender Punkt (in der Abbildung der Knoten k3) kann dafür auf den Schnittpunkt von Straße und Polygon translatiert werden. Dabei ist zu beachten, dass nicht der Knoten selbst verschoben wird (b). Es kommt sonst zu einer Verzerrung weiterer Wege, die ebenfalls diesen Punkt referenzieren.

Für eine optimale Kartenabbildung müssen die Anfangs- und Endpunkte aller Straßen innerhalb des Polygons liegen. Wird eine Straße geschnitten, endet oder beginnt jedes Teilstück am exakten Schnittpunkt (c). Dieser Punkt wird für jede Straße einzeln bestimmt, damit keine Verzerrungen auftreten und keine Fahrtverbindung aus außenliegenden Knotenpunkten möglich sind.

4.4 Datenkonvertierung mit NetConvert

Sowohl die Daten der NAVTEQ-Karte, die im GDF Format vorliegen, als auch die Rohdaten aus OpenStreetMap, welche in einem XML Format gespeichert sind, werden mit dem Tool NetConvert in ein gemeinsames Text-Datei-Schema und ein Datenbankschema konvertiert.

Das kostenlose und frei zugängliche Werkzeug ist eine Entwicklung des DLR und bereitet verschiedenste Straßennetzformate für die Verwendung mit der ebenfalls freien Simulationssoftwa-

re SUMO (Simulation of Urban MObility) ²¹ vor.

Für nicht angegebene Attribute Geschwindigkeit, Spuranzahl und Straßenpriorität werden pauschale Werte angenommen. Als Anhaltspunkt dient dabei die Straßenkategorie (FRC). Für die Daten der OpenStreetMap bestimmt NetConvert die Geschwindigkeitsbegrenzung anhand des Highway-Tags. Tabelle 4.5 zeigt die Zuordnung. Zusätzlich sind die entsprechenden Werte, welche für Straßen im manuell nachbearbeiteten Szenario Braunschweig gefunden wurden, angegeben.

Die überprüften Ergebnisse liegen deutlich unter den pauschal angenommenen Werten. Ein Vergleich mit den Werten für die Region Hannover ergab weitestgehende Übereinstimmung. Obwohl der Anteil des innerstädtischen Bereichs niedriger liegt als in Braunschweig, weisen die meisten Straßen mit Kategorien „primary/ secondary/ tertiary“ in der NAVTEQ Karte ein Geschwindigkeitslimit bei 50 km/h auf. Für die Konvertierung in das Simulationsnetz wird daher eine Umrechnungstabelle (siehe Tabelle 4.7) verwendet.

Highway-Tag	NetConvert Geschwindigkeit	Tempolimits [km/h] in Karte NAVTEQ 2010		
		häufigstes	zweithäufigstes	Vorkommen
motorway	160	100 (45%)	80 (32%)	319
motorway_link	80	50 (35%)	80 (24%)	257
trunk	100	80 (47%)	70 (41%)	38
trunk_link	80	50 (70%)	70 (18%)	17
primary	100	50 (70%)	70 (16%)	368
secondary	100	50 (82%)	70 (11%)	1675
tertiary	80	50 (65%)	30 (16%)	1600
unclassified	80	50 (50%)	30 (40%)	185
residential	50	30 (64%)	50 (30%)	8664
living_street	10	7 (49%)	30 (47%)	722

Tabelle 4.5: Zuordnung der Geschwindigkeit [km/h] von NetConvert und NAVTEQ zu OpenStreetMap Braunschweig 2014

Zur Unterstützung der Deutungsmöglichkeit des Simulationsergebnisses wird das Vorgehen der Netzkonvertierung erläutert. Für die in NetConvert gebrauchten Parameter wird eine kurze Erklärung gegeben.

Die Netze, sowohl von NAVTEQ als auch aus der OpenStreetMap, werden mit den identischen Parametern ²² konvertiert.

–geometry.remove Wege, welche identische Informationen besitzen und hintereinander liegen, werden zusammengefügt. Auf diese Weise verschwinden Knotenpunkte, über die nur eine Straße läuft. Dies hat eine Größenreduzierung der Datei und einen Geschwindigkeitsgewinn der

²¹http://sumo.dlr.de/wiki/Main_Page[16.09.2014]

²²<http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>[16.09.2014]

Tag	NetConvert Limit [km/h]	NAVTEQ 2010 häufigstes	Geschwindigkeit zweithäufigstes	abs. Anzahl fehlende
motorway	160	120 (83%)	100 (17%)	24
motorway_link	80	50 (60%)	80 (18%)	94
primary	100	100 (100%)		1
secondary	100	50 (73%)	70 (12%)	89
tertiary	80	50 (53%)	70 (18%)	119
unclassified	80	30 (52%)	50 (29%)	42
residential	50	30 (57%)	50 (35%)	1412
living_street	10	30 (48%)	7 (49%)	286

Tabelle 4.6: Zuordnung der Geschwindigkeit bei fehlender Geschwindigkeitsangabe [km/h] von NetConvert und NAVTEQ zu OpenStreetMap

OpenStreetMap Highway	Spuren je Richtung	Geschwindig- keit [km/h]
motorway	2	120
motorway_link	1	80
trunk	1	80
trunk_link	1	70
primary	1	50
primary_link	1	50
secondary	1	50
tertiary	1	50
unclassified	1	50
residential	1	30
living_street	1	10

Tabelle 4.7: Geschwindigkeitzuordnung in NetConvert

Simulation zufolge.

–no-internal-links Fahrspuren, die innerhalb des Kreuzungsbereichs eines Knotenpunktes die genauen Positionen beim Abbiegen vorgeben, werden nicht erstellt. Fahrzeuge teleportieren in diesem Fall direkt zum Ausgang des Knotenpunktes. Dies verhindert das Verkeilen der Fahrzeuge (Deadlock). In späteren Versionen mit besserer Geometrie und intelligenteren Fahrzeugen ist es denkbar auch die internen Spuren zu aktivieren, um ein realistischeres Verhalten an Knotenpunkten zu erzielen.

–tls.join Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen, die nahe beieinander liegen, werden zusammengeschaltet. Dies verhindert, dass die vom Simulationsprogramm entworfenen Schaltzeiten den Verkehr nicht behindern. Wird dieser Parameter nicht gesetzt, so tritt das Phänomen auf, dass Lichtsignale, die wenige Meter hintereinander liegen im Wechsel rot-grün oder grün-rot anzeigen und somit kein Durchfluss möglich ist. Wird der Parameter gesetzt, so wird die Signalanlage an der hinteren Haltelinie durch eine „Vorfahrt gewähren“-Regel ersetzt.

–roundabouts.guess Die Erkennung von Kreisverkehren ist eine Sonderaufgabe, bei der die besonderen Vorfahrtsregeln beim Ein- und Ausfahren auf das Simulationsnetz übertragen werden.

–ramps.guess true Autobahnauf- und Abfahrten werden erkannt und auf eine Länge von 100 m festgelegt. Das Beschleunigen und Einfädeln der Verkehrsteilnehmer auf Schnellstraßen wird hierdurch vereinfacht.

–no-turnarounds Das Wenden des Fahrzeugs an jedem Knotenpunkt wird verhindert, indem die Verbindung zur Gegenrichtung einer jeden Straße nicht existiert. Durch den eingeschränkten Bewegungsfreiraum nutzen Routen nicht die 180° Drehung. Ist das Wenden nicht untersagt, so bilden sich lange Staus, da Fahrzeuge lange Zeit warten, um in den (i.d.R. zur selben Zeit fahrenden) Gegenverkehr einbiegen zu können.

–remove-edges.isolated Einzelne, vom Hauptnetz isolierte Wege werden nicht in die Simulation übernommen. Dies verhindert das Finden von unverbundenen Start-Ziel-Paaren (vergleiche Kapitel 5.1.4)

–remove-edges.by-vclass bicycle,pedestrian,rail,rail_electric,tram,rail_urban,delivery Die Komplexität des Simulationsnetzes wird verringert, indem alle Wege, die nicht von privaten KFZ genutzt werden dürfen, entfernt werden. Übrig bleiben die Straßen des öffentlichen Raums. Nicht benötigte Knotenpunkte werden (durch `–geometry.remove`) entfernt. Lichtsignalanlagen an Fußgängerüberwegen bleiben auch ohne den Fußweg erhalten.

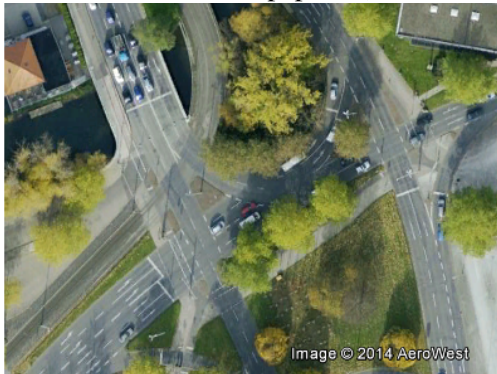
Bei der Konvertierung werden nach dem Vorbild der NAVTEQ Karte einzelne Verbindungspuren im Kreuzungsbereich angelegt, welche die Fahrtmöglichkeiten der Fahrzeuge vorgeben. Diese genauen Informationen sind nicht in der OpenStreetMap enthalten. Die Verbindungen werden anhand einer Heuristik berechnet, welche die Wichtigkeit der Straßen berücksichtigt. Zusätzlich werden explizite Abbiegeverbote (Restrictions) erkannt (vergleiche Kapitel 4.2.4). Die Unterstützung der Spurinformatoren über den „turn:lanes“-Tag findet derzeit noch nicht statt.

In Abbildung 4.10 sind die verschiedenen Stadien des Informationsgehalts dargestellt. Die meisten Informationen sind in der manuell bearbeiteten NAVTEQ Karte enthalten (oben rechts). Die Lage der Straßen und die Verknüpfungspunkte sind weitestgehend an die Realität (Luftbild oben links) angepasst. Im Gegensatz dazu ist das Ergebnis der Konvertierung mittels Heuristik unten zu sehen. Auf dem linken Bild wurden keine Abbiegeverbote eingefügt. Daher sind an jedem Knotenpunkt alle Richtungen möglich.

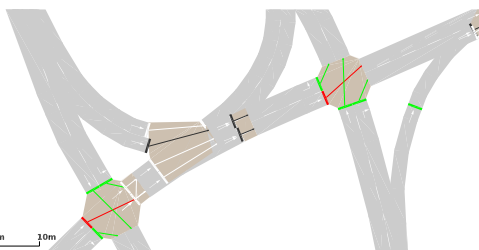
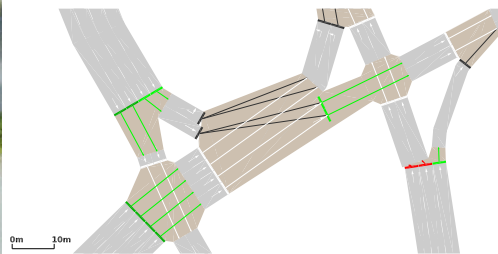
Unter Hinzunahme der Abbiegerelationen werden die unerlaubten Verbindungen gelöscht. In Zukunft könnte hier eine Erweiterung der Anzahl der möglichen Fahrten stattfinden. Momentan

haben die Enden keine weiterführende Verbindung und zwingen Fahrzeuge auf eine Parallelspur, um von dort das nächste Straßensegment zu erreichen.

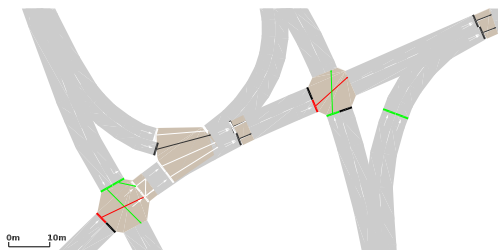
Luftbild des Gebiets Europaplatz (Braunschweig)



manuell nachgearbeitetes Modell



OSM ohne Informationen



OSM mit Abbiegeverbotten

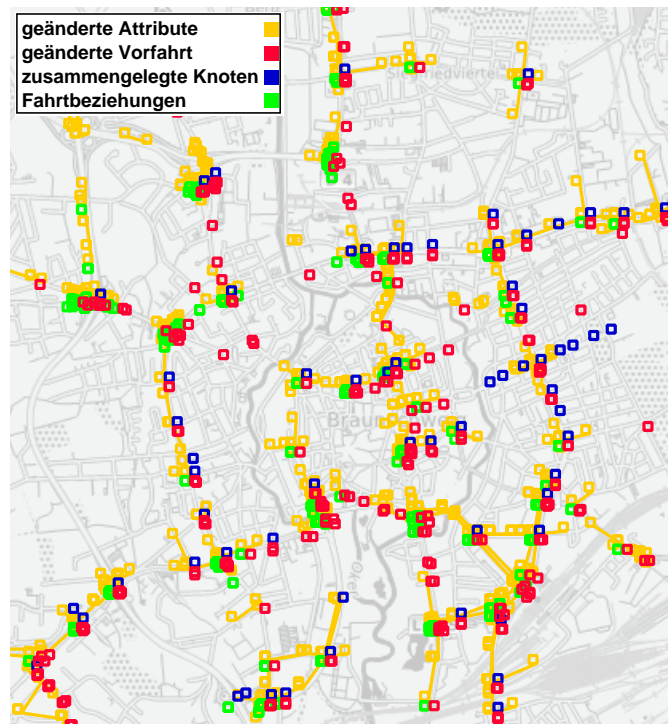
Abbildung 4.10: Detailstufen an Knotenpunkten

4.5 Kartenversionen

Aus den zwei vorgestellten Straßenkarten-Quellen werden jeweils zwei digitale Straßenkarten gewonnen.

4.5.1 Datenquelle

NAVTEQ 2010 Das Kartenmaterial von 2010 liegt nur für die Stadt Braunschweig vor. Es wurde über Vergleiche mit Satellitenbildern und Ortskenntnissen angereichert und in einen realitätsnahen Zustand versetzt. Es scheint daher als besonders geeignet für den Einsatz als echte Referenz. Die Bearbeitung betrifft 4% der Daten in den Bereichen Geschwindigkeit, Spuranzahl, Abbiegebeziehungen und Vorfahrtsprioritäten. Der Bearbeitungszeit für die Erstellung dieses Zustandes aus den Rohdaten betrug etwa ein Ein-Personen-Halbjaahr (ca. 1000 Arbeitsstunden). Die Veränderungen fanden hauptsächlich auf den Hauptstraßen statt, da dort die Gefahr eines Verkehrskollaps hoch ist (siehe Abbildung 4.11). Um den Verkehrsfluss an großen Knotenpunkten nicht durch dicht folgende Haltelinien zu behindern, wurden Knotenpunkte zusammengelegt.



Quelle (Hintergrund): OpenMapSurfer [23]

Abbildung 4.11: Manuelle Änderungen im NAVTEQ 2010 Braunschweig Netz

NAVTEQ 2013 Aus dem aktuellsten vorliegenden Kartenmaterial (2.Quartal 2013) stellt es den unbearbeiteten Zustand der NAVTEQ Karte dar, der in dieser Form in Navigationsgeräten eingesetzt wird.

OpenStreetMap 2013 Ein kompletter Auszug aller Ways aus einem OSM Datenbank Abbild (Planetfile) Stand Juni 2013. Diese Rohdaten liegen im .osm-xml-Format vor. Der zeitliche Stand entspricht dem der NAVTEQ 2013 Karte, wodurch sich diese beiden besonders gut für einen Vergleich eignen.

OpenStreetMap 2014 Für einen aktuellen Stand des Straßennetzes wurde ein Auszug aus der OSM-Datenbank im Juni 2014 erzeugt.

Alle OpenStreetMap Daten und die NAVTEQ Karte von 2013 liegen für die Verwaltungsgrenzen Braunschweig und Region Hannover vor. Anhand dieser wurden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt.

Durch die manuelle Nachbearbeitung der NAVTEQ 2010 Karte gilt diese für Braunschweig als Referenzkarte. Für Hannover ist keine nachbearbeitete Karte vorhanden.

Die Region Hannover wurde als zweites Vergleichsgebiet gewählt, da sich Konflikte durch höher aufgelöste Straßenbilder und vorhandene Ortskenntnis einfacher lösen und verifizieren lassen.

4.5.2 Datenkonvertierung

Von den oben vorgestellten Datenquellen werden für die Bewertung drei unterschiedliche Versionen erzeugt.

Rohdaten

Die aus den GDF- oder OSM-Dateien erzeugten Netze enthalten alle Rohdaten. Keine Attribute wurden hinzugefügt oder verändert. Sie kann besonders gut für die reine Längenanalyse verwendet werden

Da in dieser Version sehr viele Fahrradwege, Bürgersteige und Pfade enthalten sind, kann es bei der Bewertung von Überlagerungen (Kanten-Matching, Kapitel 4.6) zu Fehlzuordnungen kommen.

Öffentliche Straßen

Um die Zuordnung der Matching-Verfahren zu erleichtern und Fehler zu vermeiden, werden die Rohdaten gefiltert. In dieser Karte sind nur Straßen enthalten, die für jeden PKW zugänglich sind. Anliegerstraßen und Service-Straßen in OpenStreetMap werden dabei ausgeschlossen. Daher kann die resultierende Länge nach der Filterung erheblich kleiner sein. Die Attribute der Straßen bleiben unberührt.

Diese Version ist gut für den Vollständigkeitsvergleich mit Straßen-Überlagerung und für die Erkennung von Abbiegebeziehungen geeignet.

Konvertiert (zu Simulationsnetz)

Für den Einsatz in der Verkehrsflusssimulation werden die Rohdaten mit dem Programm Net-Convert konvertiert (siehe Kapitel 4.4). Dabei werden ebenfalls die Wege nach ihrer Benutzungsart gefiltert, sodass größtenteils öffentliche Wege übrig bleiben. Die Straßenmenge entspricht jedoch nicht der Menge mit „öffentlichen Straßen“.

Bei der Konvertierung werden sowohl die Geometrien der Straßen leicht verändert als auch nicht vorhandene Attribute mit Standardwerten besetzt. An Knotenpunkten werden fehlende Abbiegebeziehungen über Heuristiken nachgebildet. Das so entstandene Netz ist durch den massiven Eingriff Attribute und Geometrie nicht für eine direkte Gegenüberstellung geeignet. Die Eingriffe sind jedoch nötig, um die Simulation darauf anzuwenden, denn die Karte wird für die Routenlängen und -zeitvergleiche genutzt.

4.6 Kanten-Matching

Zur Untersuchung der Deckungsgleichheit zweier digitaler Karten wird untersucht, ob sich die enthaltenen Objekte in beiden Datensätzen finden lassen. Die Abbildung einzelner Straßen und ganzer Routen aus einer Karte in eine andere geschieht mittels sogenannter Edge-Matching-Verfahren. Diese suchen anhand der Geometrie und spezifischer Attribute nach den sich jeweils entsprechenden Wegen in unterschiedlichen Karten. Die gefundenen Überlagerungen werden

zunächst für die Bewertung der vorhandenen Straßengeometrien (vergleiche Kapitel 3.3) genutzt. Mit den gefundenen Paaren erfolgt die Auswertung der Attributqualität (vergleiche Kapitel 3.5).

4.6.1 Bewertung eines Matching-Verfahrens

Bevor die Bewertung der Überlagerung der Graphen möglich wird, ist ein geeignetes Verfahren zu wählen, welches die sich entsprechenden Kantenpaare zuverlässig erfasst. Dabei kann es zu Fehlern kommen, welche Auswirkungen auf das spätere Ergebnis der Untersuchung haben. Für die Abschätzung eines Verfahrens wird die Tabelle 4.8 mit geprüften Ergebnissen erstellt.

		in Referenzkarte	
		vorhanden	fehlend
in Testkarte	gefunden	TP	FP
	nicht gefunden	FN	TN

TP: True Positive - Übereinstimmungen gefunden

FN: False Negative - Keine Entsprechung gefunden obwohl vorhanden

FP: False Positive - Übereinstimmung gefunden obwohl nicht vorhanden

TN: True Negative - Keine Entsprechung, da nicht vorhanden

Tabelle 4.8: Kanten-Treffer-Qualität Definition

Zur Bewertung der Trefferqualität wird das Kombinierte Maß (F-Maß) bestimmt. Die Genauigkeit (precision) p , welche aus den erkannten ($TP+FP$) und richtig erkannten (TP) Paaren gebildet ist, fließt darin ebenso ein wie die Sensitivität (recall) r , welche aus richtig erkannten (TP) und tatsächlich positiven ($TP+FN$) Paaren berechnet wird [8].

$$\text{Genauigkeit } p = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.1)$$

$$\text{Sensitivität } r = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.2)$$

Das F-Maß gewichtet Genauigkeit und Sensitivität gleichermaßen.

$$F = 2 \cdot \frac{p \cdot r}{p + r} \quad (4.3)$$

Für das Kanten-Matching ist ein Verfahren zu wählen, dessen F-Maß möglichst hoch ist. Das Maß liegt im Intervall zwischen 0 (schlechtes Ergebnis) und 1 (bestes Ergebnis).

Die Erfassung und Einteilung jedes Paares nimmt ein Mensch vor, welcher jeden Eintrag einzeln überprüft und in die Tabelle 4.8 einträgt. Die Auswahl kann zu einem Teil automatisiert werden. Über verschiedene Distanzfunktionen (Vorstellung in Kapitel 3.2) erfolgt eine Vorfilterung der

Einträge. Paare, deren Abstandswerte bestimmte Werte unterschreiten können mit hoher Wahrscheinlichkeit als korrekte Treffer angenommen werden.

Der „mittlere Abstand“ ist eine Funktion, bei dessen Überschreitung eines Wertes von 5 Metern genau geprüft wird, ob es sich wirklich um ein Paar handelt. Bei einem mittleren Abstand von weniger als 5 Metern wurden im vorliegenden Material keine Falschzuordnungen erkannt.

Da beim mittleren Abstand die Referenzlänge nur von einem der zu vergleichenden Objekte abhängig ist (siehe Gleichung 3.8), kann der Wert bei großen Längenunterschieden verfälscht werden. Wenn ein kurzer Weg durch einen langen abgebildet wird entstehen „überstehende Enden“. Diese werden von der Hausdorff-Distanz und Parametrischen/Fréchet-Distanz angezeigt, da diese die gesamte Geometrie überprüft und keine Relativierung über eine Länge vornimmt (siehe Gleichung 3.1). Bei sehr großen Unterschieden zwischen der Referenz- und Testlänge ist zu bewerten, ob es sich tatsächlich noch um ein Paar handelt. Teilen sich beide Kanten einen deutlichen Streckenabschnitt, ist eine Kante jedoch mehrere hundert Meter kürzer, kann nicht von einer Übereinstimmung ausgegangen werden. In dieser Arbeit werden alle Treffer unabhängig von der Übereinstimmungslänge als Paare angenommen. Für die weitere Bearbeitung wird die Länge des gemeinsamen Verlaufs sowie die nicht entsprechenden Längen gespeichert, um bei der Gewichtung der Ergebnisse genaue Zahlen zu erhalten.

Die zu bewertenden Verfahren sind die im Folgenden beschriebenen Algorithmen „Open Local Referencing“ und „Geometry Matching“.

4.6.2 OpenLR - Open Location Referencing

OpenLRTM wurde 2009 vom Navigationssystemhersteller TomTom als lizenzfreie Technologie eingeführt. Mit ihr kann die Beschreibung von Routen auf Karten unterschiedlicher Anbieter durchgeführt werden.

Eine Route wird häufig über eine Abfolge der befahrenen Kanten beschrieben. Zur Identifizierung wird dabei die eindeutige ID verwendet. Unterscheiden sich die digitalen Straßenkarten vom Urheber oder der Version, so haben gleiche Kanten meist unterschiedliche IDs und die Beschreibung kann nicht übertragen werden.

OpenLR verwendet keine Darstellung der gesamten Route. Zunächst werden Start- und Zielkante über folgende Eigenschaften auf der Encoder-Karte identifiziert:

- Startkoordinate der Kante
- Lagewinkel (Bearing) im Uhrzeigersinn zu 90° Nord
- Straßenkategorie (Functional Road Class) beschreibt die Wichtigkeit der Straße
- Straßenbauart (Form of Way) beschreibt den Ausbauzustand der Straße
- Distanz zum nächsten Orientierungspunkt

Nach der Beschreibung der Start- und Zielkante wird die *kürzeste* Verbindung zwischen ihnen bestimmt.

Weicht die zu codierende Route von diesem Weg ab (sie mag beispielsweise als schnellste Route

nicht die kürzeste sein), so wird am Abzweigepunkt ein Orientierungspunkt mit einer ausgehenden Kante eingeführt. Die ausgehende Kante dirigiert die Route neu. Diese Prozedur wird wiederholt, bis die codierte Route mit der gewünschten übereinstimmt.

Das Protokoll von OpenLR wurde für eine effiziente Datenübermittlung entwickelt. Alle Informationen werden in einem BitString gespeichert. Dazu werden die Informationen in Rastern eingeteilt.

Die WGS84-Koordinaten sind bis auf die fünfte Dezimalstelle gespeichert.

Die Winkelangaben (Bearing) ist in 32 Segmente zu je $11,25^\circ$ eingeteilt.

Es gibt acht Klassen für die Straßenkategorie, sowie acht Klassen für den Ausbauzustand.

Die Bewertung des Algorithmus nach Kapitel 4.6.1 ergibt die Tabelle 4.9.

	in Karte 2 vorhanden	in Karte 2 fehlend
gefunden	15896 (TP)	811 (FP)
nicht gefunden	503 (FN)	83 (TN)

Tabelle 4.9: Kanten-Treffer-Qualität bei OpenLR

Die Kennzahlen ergeben sich damit zu

$$\text{Genauigkeit} \quad p = \frac{15896}{15896 + 811} = 0,9515 \quad (4.4)$$

$$\text{Sensitivität} \quad r = \frac{15896}{15896 + 503} = 0,9693 \quad (4.5)$$

$$\text{Maß} \quad F = 2 \cdot \frac{p \cdot r}{p + r} = 0,9603 \quad (4.6)$$

Trotz des internen Rankings werden viele Kanten falsch zugeordnet. Grund dafür ist der geringe Informationsaustausch zwischen Encoder und Decoder über den BitString. Bei der Decodierung wird ein hoher Toleranzbereich verwendet, um die entsprechende Kante zu finden.

Eine manuelle Justierung der Encoder- und Decoder-Parameter ist möglich, das Problem des sehr beschränkten und groben Datenaustausches bleibt jedoch bestehen.

4.6.3 Geometrie Matching

Aufgrund der eingeschränkten Informationen, die über das OpenLR Verfahren für das Matching zur Verfügung stehen, wird ein zweiter Algorithmus entwickelt, mit dem äquivalente Kanten gefunden werden können. Dieser kann jedoch nur 1:N (in Referenzkarte:Testkarte) Beziehungen finden.

Zum Vergleich wird in der Grundversion ausschließlich die Information aus der Geometrie der Kanten verwendet. Der Hauptindikator für die Übereinstimmung ist der durchschnittliche Abstand zwischen beiden Kanten. Da die Kanten in der Regel nicht gleichermaßen lang sind, findet eine gegenseitige Projektion statt (siehe Abbildung 4.12). Zwischen den Teilkanten wird die

eingeschlossene Fläche berechnet und anschließend auf die Länge der durch die Projektion verkürzten Referenzkante bezogen.

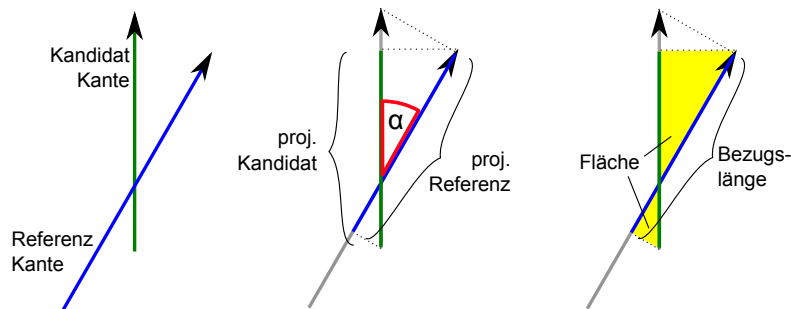


Abbildung 4.12: Bewertung einer Kantenpaarung

Bei der eingeschlossenen Fläche kann es sich bei kreuzweiser Überlagerung der Kanten um ein überschlagenes Polygon handeln, dessen Flächenberechnung gesondert stattfinden muss. In einem solchen Fall wird das Polygon in Teilflächen zerlegt, um eine Subtraktion zu verhindern. Der Ablauf der Suche nach den 1:N Entsprechungen einer Referenz-Kante wird im Algorithmus 1 (Seite 49) beschrieben.

Die Prozedur ist der Bewertungsdurchlauf zum Finden des besten Abbildes. Da eine Referenzkante durch mehrere Kanten in der Testkarte abgebildet werden kann, wird zunächst die am besten abbildende Kante gesucht und anschließend von dieser aus mit- und gegen die Fahrtrichtung weitere passende Kanten angehängt.

Für jede Kante in der Referenzkarte wird die Funktion in Algorithmus 2 (Seite 50) zur Bestimmung der Abfolge der Kanten in der Testkarte verwendet. Sowohl die Werte einzelner Attribute der Kanten, als auch die Gesamtbewertung müssen erfüllt sein, um als Abbildkante in die Auswahl aufgenommen zu werden. Für die geometrischen Eigenschaften haben sich folgende Werte als praktikabel erwiesen:

- max. mittlerer Abstand = 20 m
- max. Abweichwinkel = $40^\circ \hat{=} 0,698 \text{ rad}$
- min. Länge nach wechselseitiger Projektion = 3 m

Der maximal zulässige mittlere Abstand ergibt sich aus der Ungenauigkeit der Koordinatenbestimmung mit GPS zu jeweils 10 m. Der Positionsfehler wird mit 3 bis 20 m angegeben [13]. Eine manuelle Auswertung ergab, dass der mittlere Abstand zwischen eindeutig gleichbedeutenden Kanten häufig mehr als 10 m beträgt. Die Ungenauigkeit ist ebenfalls auf die Verwendung von Luftbildern zurückzuführen, die eine geringe Auflösung haben oder nicht exakt positioniert wurden.

Der große Toleranzbereich des Winkels ist nötig, um „Schlenker“ an Knotenpunkten zu erfassen. Diese treten auf, wenn bauliche Trennungen lediglich in einem Kartenmaterial vorhanden sind, während im anderen eine gemeinsame Kante für Hin- und Rückrichtung vorliegt.

Allzu kurze Abschnitte sind in den meisten Fällen Projektionsfehler, bei denen ein minimaler Bereich einer sich anschließenden Kante mit als Kandidat gewertet wird. Diese Kantenabschnitte werden nicht als potenzielle Abbilder betrachtet.

Algorithmus 1 Prozedur zur Bestimmung der passendsten Abbildungskante

```

1: procedure KANTENBEWERTUNG( Referenzkante  $k_{ref}$ , Liste<Kante>  $Kandidaten$ )
2:   Warteschlange := Geordnete Liste der Kandidaten (leer)
3:
4:   for  $k$  in  $Kandidaten$  do
5:      $k'_{ref} \leftarrow$  Projektion  $k$  auf  $k_{ref}$ 
6:      $k' \leftarrow$  Projektion  $k_{ref}$  auf  $k$  ▷ Projektion der Kanten aufeinander
7:      $L_{proj} \leftarrow$  gemeinsame Verlaufslänge  $k'_{ref}$  und  $k'$ 
8:     if ( $L_{proj} \leq L_{min}$ ) then ▷ bei Unterschreitung einer Mindestlänge
9:       continue ▷ nicht betrachten
10:    end if
11:
12:     $\alpha \leftarrow$  Winkel zwischen dem gemeinsamen Verlauf
13:    if  $\alpha \geq \alpha_{max}$  then ▷ bei Überschreitung eines Winkels
14:      continue ▷ nicht weiter betrachten
15:    end if
16:
17:     $A \leftarrow$  Fläche zwischen beiden Verlaufslinien
18:     $a \leftarrow \frac{A}{L_{proj}}$  ▷ mittlerer Abstand
19:    if  $a \geq a_{max}$  then ▷ bei Überschreitung eines Maximums
20:      continue ▷ nicht betrachten
21:    end if
22:     $b \leftarrow$  Bewertung anhand gefundener Parameter ▷ Formel 4.7
23:
24:    Reihe  $k$  in Warteschlange mit  $b$  ein
25:  end for
26:
27:  Sortiere Warteschlange so, dass gute Bewertungen  $b$  vorne stehen
28: return Warteschlange
29: end procedure

```

Algorithmus 2 Funktion zum Finden des abbildenden Kantenzugs

```

1: function SUCHE ABBILDER( Referenzkante  $k_{ref}$ , Karte Testkarte, float radius)
2:   Abbilder  $\leftarrow$  neue Kanten-Liste
3:
4:   Startkandidaten  $\leftarrow$  Suche Kanten in Testkarte mit radius um  $k_{ref}$ 
5:   Warteschlange  $\leftarrow$  Kantenbewertung( $k_{ref}$ , Startkandidaten)
6:   BestesAbbild  $\leftarrow$  Bestes Element aus Warteschlange
7:   if BestesAbbild = null then                                     ▷ kein Abbild gefunden
8:     return null                                                  ▷ Abbruch dieser Suche
9:   end if
10:
11:   StartKante  $\leftarrow$  BestesAbbild
12:
13:   while StartKante  $\neq$  null do                                     ▷ Vorwärtssuche
14:     StartKante an Abbilder hinten anhängen wenn nicht enthalten
15:     Startkandidaten  $\leftarrow$  Von StartKante ausgehende Kanten
16:     Warteschlange  $\leftarrow$  Kantenbewertung( $k_{ref}$ , Startkandidaten)
17:     StartKante  $\leftarrow$  Bestes Element aus Warteschlange
18:   end while
19:
20:   StartKante  $\leftarrow$  BestesAbbild
21:
22:   while StartKante  $\neq$  null do                                     ▷ Rückwärtssuche
23:     StartKante in Abbilder vorne einfügen wenn nicht enthalten
24:     Startkandidaten  $\leftarrow$  An StartKante ankommende Kanten
25:     Warteschlange  $\leftarrow$  Kantenbewertung( $k_{ref}$ , Startkandidaten)
26:     StartKante  $\leftarrow$  Bestes Element aus Warteschlange
27:   end while
28:   return Abbilder                                               ▷ geordnete Liste der Abbilder
29: end function

```

Nach der Einzelprüfung findet die Bewertung über eine Summe gewichteter Differenzen statt. Ein gutes Matching zweier Kanten zeichnet sich durch eine kleine Gesamtdifferenz (D) aus. Die Abweichung des Winkels wird dabei zusätzlich zum mittleren Abstand in die Summe 4.7 eingebracht.

$$D = a + a \cdot \alpha + a$$

$$D' = a + a \cdot \alpha + a \cdot \Delta_{FRC} \cdot 0,5$$

mit:

(4.7)

a : mittlerer Abstand

α : Winkel zwischen Kanten [rad]

Δ_{FRC} : Abstufung in der Straßenkategorie

Für die rein geometrische Bewertung (D) ist ein maximaler Wert von 30 m angemessen. Zusätzlich zu den rein geometrischen Eigenschaften kann die Straßenklasse als weiteres Kriterium hinzugezogen werden. Auf diese Weise kann verhindert werden, dass sehr nah beieinander verlaufende Wege (z.B. Autobahn \leftrightarrow Feldweg, Straße \leftrightarrow Fußweg) fälschlicherweise als Äquivalente angenommen werden. Der maximale Wert für D' wird dazu auf 40 m erhöht.

Eine Bewertung des rein geometrischen Algorithmus entsprechend 4.6.1 ist in Tabelle 4.10 eingetragen. Die Kennzahlen ergeben sich damit zu:

	in Karte 2 vorhanden	in Karte 2 fehlend
gefunden	16939	63
nicht gefunden	40	251

Tabelle 4.10: Kanten-Treffer-Qualität ohne Grenzwert

$$\text{Genauigkeit } p = \frac{16939}{16939 + 63} = 0,9963 \quad (4.8)$$

$$\text{Sensitivität } r = \frac{16939}{16939 + 40} = 0,9976 \quad (4.9)$$

$$\text{Maß } F = 2 \cdot \frac{p \cdot r}{p + r} = 0,9969 \quad (4.10)$$

Zur Reduzierung der 63 fälschlicherweise gefundenen Kanten (FP) wird die Bewertung mit Straßenkategorie durchgeführt.

(siehe Tabelle 4.11). Die Kennzahlen ergeben sich zu

	in Karte 2 vorhanden	in Karte 2 fehlend
gefunden	16908	50
nicht gefunden	54	281

Tabelle 4.11: Kanten-Treffer-Qualität mit Straßenklasse

$$\text{Genauigkeit} \quad p = \frac{16908}{16908 + 50} = 0,9971 \quad (4.11)$$

$$\text{Sensitivität} \quad r = \frac{16908}{16908 + 54} = 0,9968 \quad (4.12)$$

$$\text{Maß} \quad F = 2 \cdot \frac{p \cdot r}{p + r} = 0,9969 \quad (4.13)$$

Die Erklärung für das gleiche F-Maß ist in der Straßenklasse zu finden. Im Anwendungsfall wird deutlich, dass mit FRC-Einbeziehung besonders im Innenstadtbereich Straßen korrekt abgebildet wurden, welche vorher auf parallel verlaufenden Fuß- oder Radwegen bezogen waren. Gleichzeitig erhöht die modifizierte Bewertung einen Anstieg der Gesamtsumme, da die Straßenkategorie (auf augenscheinlich gleichen Straßen) um mehr als 2 Stufen abweicht.

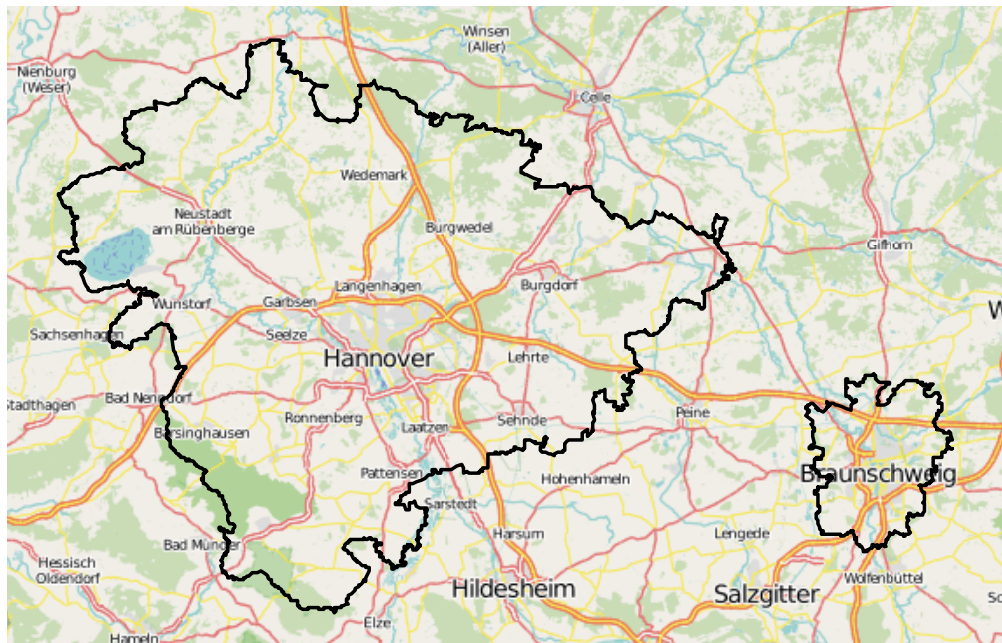
Für die weitere Verwendung wird die modifizierte Variante mit Berücksichtigung der Straßenkategorie gewählt.

5 Ergebnisse

Die Auswertung findet auf zwei unterschiedlichen Versionen der Straßenkarte statt. Um die Attribute der Karten und den Informationsgehalt zu vergleichen werden die digitalen Straßenkarten zunächst direkt auf ihren Rohdaten verglichen. Im Falle der NAVTEQ Netze werden die GDF Dateien in ein vom DLR entworfenes Zwischenformat umgeschrieben, wobei keine Attribute verändert werden. Die OpenStreetMap Informationen werden direkt aus einem Datenbankauszug des Internetportals oder aus einem erdumfassenden Auszug (sog. „Planetfile“ mit Bearbeitungsstand z.B. 20. Juni 2013, Größe ≈ 22 GB) gelesen.

Für die Untersuchung der Eignung hinsichtlich des Einsatzes in der Verkehrsflusssimulation findet eine Konvertierung mittels des Werkzeugs NetConvert (siehe Kapitel 4.4) statt. Nur auf dem so erzeugten Netz ist die Durchführung der Verkehrsflusssimulation möglich.

Der strategische Vergleich umfasst die Untersuchung der Straßennetzlänge, Abbiegebeziehungen, Höchstgeschwindigkeit und Spuranzahl sowie der Vollständigkeit von Einschränkungen wie maximaler Maße und Lasten. Die erste Untersuchung wird an der Straßenkarte der Stadt Braunschweig (Niedersachsen) durchgeführt. Um zusätzlich eine größere Karte mit mehr Landstraßen zu untersuchen, wird anschließend das Netz der Region Hannover bewertet (siehe Abbildung 5.1). Abschließend wird eine Analyse der Karte der Stadt Darmstadt (Hessen) durchgeführt. Da diese ähnliche Dimensionen wie Braunschweig aufweist, ist sie für eine Vergleichsuntersuchung geeignet.



Quelle: OpenStreetMap.org [16]

Abbildung 5.1: Verwaltungsgebiete Region Hannover & Braunschweig

5.1 Vergleich im Gebiet Braunschweig

Die Karte der Stadt Braunschweig besitzt eine Ausdehnung in Nord-Süd Richtung von etwa 12 km, in West-Ost Richtung von 7 km. Das NAVTEQ Kartenmaterial liegt für diese Stadt zusätzlich in einer manuell bearbeiteten Version (NAVTEQ 2010) vor (vergleiche Kapitel 4.5.1) In dieser sind ebenfalls die Verkehrsnachfragen für einen Tag mit PKW und LKW bekannt. Eine Routenführung jeder Nachfrage wurde im Vorfeld generiert, sodass der Weg jedes Fahrzeugs bekannt ist. Mit dieser Information lässt sich auf dieser Karte eine Vernetzungsanalyse mit Routensuche durchführen, über welche die Eignung als Simulationsnetz bewertet wird.

5.1.1 Straßennetzlänge

Für die Untersuchung der Summe der vorhandenen Weglängen wird über die jeweils zu untersuchenden Karten ein Ausschnittspolygon gelegt, das von diesen ausgefüllt wird. Überstehende Wege werden abgeschnitten und zählen nicht in die Summe (vergleiche Kapitel 4.3)

Um den Einfluss baulicher Veränderungen auszuschließen, werden zunächst die Versionen der Karte von 2013 von NAVTEQ und OpenStreetMap gegenübergestellt (siehe Tabelle 5.1). Deutlich zu erkennen ist die um 124 % höhere Gesamtlänge der OpenStreetMap. Gleiche Zahlen finden sich bei der Länge für Fuß- und Fahrradwege (+123 / +127 %). Für den öffentlichen Straßenverkehr übertrifft sie die NAVTEQ Karte um 21 %.

Da es sich bei der NAVTEQ Karte um eine Navigationskarte für PKW handelt, ist die niedrige Zahl der erfassten Rad- und Fußwege zu erklären.

OpenStreetMap umfasst viele zugängliche Straßen, unter denen für Autofahrer irrelevante Informationen sind. So sind Parkplätze mit allen Fahrspuren und Parkschleifen oder Zufahrten auf Grundstücke detailliert eingetragen. Die Zahl der Fußwege kommt durch die Einträge in Fußgängerzonen, Parks, Gartensiedlungen und Feldwege zustande. In der Summe ergibt sich somit eine beachtliche Zusatzlänge.

Die hohe Anzahl an exklusiv vorhandenen Straßen in der OpenStreetMap kommt durch die Wege, die als „highway=service“ bezeichnet sind, zustande. Es handelt sich dabei meist um öffentlich erreichbare Straßen, die jedoch keine Durchgangsfunktion besitzen. Beispielsweise werden Parkplätze, Tankstellen oder Firmenzufahrten als solche bezeichnet. Würden diese nicht eingerechnet, erhielte die OpenStreetMap 2013 lediglich eine Länge des öffentlichen Straßennetzes von 1.600 km (-12 % gegenüber NAVTEQ 2013). Die NAVTEQ Karte überlagert eine Länge von 30 km mit „Service“-Wegen der OpenStreetMap. Diese kann damit nicht mehr so viele Wege der NAVTEQ Karte abbilden, obwohl sie die entsprechenden Straßen besitzt.

Um eine möglichst große Überschneidungsmenge zu erhalten und den öffentlich zugänglichen Raum bestmöglich zu erfassen, zählen Service-Wege zu den öffentlichen Straßen, wenn der Zugang nicht explizit beschränkt ist.

Bewertung

Die OpenStreetMap besitzt eine größere Netzlänge sowohl für die PKW Navigation (+21 %) als auch darüber hinaus für Rad- und Fußwege. Das Ergebnis spricht für die OpenStreetMap als detailliertere Karte. Eine Bestätigung muss über die Netzabdeckung erfolgen.

	Weglänge in Kilometer			
	NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
Gesamtlänge	1.981,8	2.040,0	4.573,4	4.662,7
öffentlich	1.980,7	1.827,1	4.286,1	4.370,9
privat	1,1	212,8	327,4	291,7
PKW geeignet	1.779,9	1.827,1	2.213,4	2.268,7
Fahrradfahrer geeignet	1.496,5	1.662,2	3.664,6	3.750,1
Fußgänger geeignet	1.855,6	1.821,2	4.141,1	4.208,8

Tabelle 5.1: Weglängen Braunschweig (Rohdaten der Straßennetze)

5.1.2 Netzabdeckung

Die qualitative Bewertung erfolgt mit der Geometrie-Matching-Methode (vergleiche Kapitel 4.6.3). Jede Kante aus jeder Karte kann dabei durch mehrere Kanten einer anderen Karte abgebildet werden. Es ergibt sich eine 4x4 Tabelle, da jedes Kartenmaterial sowohl als Referenz, als auch als Abbildungsmaterial genutzt wird.

In der Tabelle 5.2 ist die Anzahl der gefundenen Paare aufgelistet. Jede Karte ist dabei für jede andere Karte einmal als Referenz und als Testkarte eingesetzt worden.

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen der NAVTEQ 2010 Referenzkarte und der NAVTEQ Karte von 2013 ist höher als die zur OpenStreetMap von 2013 oder sogar 2014. Wird die unbearbeitete NAVTEQ Karte 2013 als Referenz genutzt, so wird die reine Anzahl der Paare von allen anderen Karten in gleicher Weise erreicht ($\approx 97\%$).

Die Anzahl der Kanten ist durch die vielen unterschiedlichen Segmentierungen der Straßen keine aussagekräftige Bewertungsgrundlage. Für eine solche werden die übereinstimmenden Längen der Straßenpaare verglichen. Dies geschieht zum einen für alle Straßen in Tabelle 5.3, für die öffentlichen Straßen in Tabelle 5.4 und in der konvertierten Form, in der nur noch solche, für die Simulation relevanten Straßen enthalten sind, in Tabelle 5.5.

Die Betrachtung der Referenzkarte NAVTEQ 2010 zeigt, dass sie am besten durch ihre Nachfolgeversion 2013 sowohl in den Rohdaten (98 %), öffentlichen Straßen (98 %) als auch in der konvertierten Variante (95 %) abgebildet werden kann. Die OpenStreetMap liegt bei den ungefilterten Rohdaten und den Simulationsnetzen die Fällern und in beiden Altersversionen mit etwa 5 Prozentpunkten hinter der NAVTEQ Karte zurück. Bei den öffentlichen Straßen ist die Überlagerung deutlich geringer. Hier erreichen die Versionen der OpenStreetMap lediglich rund 88% der NAVTEQ Straßen (2010 & 2013).

Die Versionen verschiedener Jahre haben sowohl bei der NAVTEQ Karte als auch bei der OpenStreetMap nur minimale Auswirkungen ($\pm 2\%$) auf die Überlagerung. Karten der gleichen Quellen decken sich zwischen 94 und 98 %.

Wird die OpenStreetMap als Referenzmaterial genutzt, werden ihre Rohdaten von NAVTEQ

Referenz		Testkarte			
Karte	Kanten	NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
NT 2010	17339		17266	16762	16772
NAVTEQ 2013	18879	18295		18268	18298
OSM 2013	63842	27011	27708		62843
OSM 2014	67767	28201	28949	65025	

Tabelle 5.2: Anzahl gefundene Kanten (Rohdaten, Braunschweig)

Referenz		Testkarte			
Karte	Länge	NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
NT 2010	1.990		(98%) 1.957	(94%) 1.864	(93%) 1.858
NT 2013	2.040	(96%) 1.965		(95%) 1.931	(94%) 1.926
OSM 2013	4.573	(44,%) 2.029	(45%) 2.077		(97%) 4.438
OSM 2014	4.662	(44%) 2.062	(45%) 2.115	(97%) 4.525	

Tabelle 5.3: Gemeinsame Straßenlänge [km] (Rohdaten, Braunschweig)

Referenz		Testkarte			
Karte	Länge	NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
NT 2010	1.788		(98%) 1.751	(87%) 1.558	(88%) 1.570
NT 2013	1.827	(96%) 1.763		(88%) 1.606	(89%) 1.622
OSM 2013	2.146	(74%) 1.580	(75%) 1.620		(98%) 2.104
OSM 2014	2.182	(73%) 1.587	(75%) 1.631	(96%) 2.100	

Tabelle 5.4: Gemeinsame Straßenlänge [km] (öffentliche Straßen, Braunschweig)

Referenz		Testkarte			
Karte	Länge	NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
NT 2010	1.839		(95%) 1.757	(90%) 1.654	(89%) 1.640
NT 2013	1.824	(94%) 1.726		(88%) 1.599	(87%) 1.590
OSM 2013	2.370	(68%) 1.603	(68%) 1.604		(97%) 2.300
OSM 2014	2.351	(68%) 1.595	(68%) 1.597	(98%) 2.298	

Tabelle 5.5: Gemeinsame Straßenlänge [km] (konvertiertes Simulationsnetze, Braunschweig)

nur in 44,4 % der Fälle (2010), beziehungsweise 45,4 % (2013) abgebildet. Werden durch die Konvertierung für die Navigation überflüssige Wege herausgenommen, beträgt die Abdeckung durch die NAVTEQ 2010 & 2013 Karten 68 %. Das beste Ergebnis erreicht die NAVTEQ Karte im Vergleich der öffentlichen Straßen aus den Rohdaten mit 75 %.

Bewertung

Für die Verwendung als Simulationsnetz ist die Annäherung an die NAVTEQ 2010 Karte ein entscheidendes Qualitätsmerkmal, da eine große Differenz einen hohen Bearbeitungsaufwand für die Annäherung an die als Realität geltende Kartenversion 2010 impliziert. Nach dieser Überlegung ist die NAVTEQ 2013 Karte mit 95 % Übereinstimmung der OpenStreetMap (90 %) vorzuziehen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die OpenStreetMap die Straßen der NAVTEQ Karten besser abbilden kann, als dies in umgekehrter Weise der Fall ist. Der Unterschied zwischen den Abbildungen ist deutlich. Fehlen in der OpenStreetMap lediglich 10 %, so kann die NAVTEQ Karte gut 32 % der OpenStreetMap nicht darstellen.

In der Netzabdeckung ist somit die OpenStreetMap die bessere Wahl, da sie mehr Straßen verzeichnet.

Durch den minimalen Unterschied in der Überlagerung kann eine Aussage über die Qualität der OpenStreetMap auch mit der Untersuchung lediglich einer Version durchgeführt werden. Für die weiteren Untersuchungen braucht nur noch die OpenStreetMap 2014 Karte herangezogen werden, da sich bauliche (geometrische) Veränderungen innerhalb der wichtigen Straßen kaum ereignet haben. Die zu untersuchenden Attribute und Relationen werden erst in jüngster Zeit vermehrt eingetragen (vergleiche Kapitel 4.2) und sollten daher mit dem aktuellsten vorliegenden Material bewertet werden.

5.1.3 Abbiegebeziehung

Die Karten haben eine sehr unterschiedliche Anzahl an expliziten Abbiegeverböten. In Tabelle 5.6) werden die befolgten und nicht befolgten Vorschriften eingetragen. Je höher der erste Wert und je niedriger der zweite Wert sind, desto besser bildet die Testkarte ihre Referenz ab. Wenn die referenzierten Wege, auf welche sich eine Abbiegerelation bezieht, nicht zu finden sind, wird keine Suche durchgeführt. Da eine Bewertung fehlt, entspricht die Summe der befolgten und nicht befolgten Beziehungen nicht der Anzahl der Verböte in der Referenzkarte. In Tabelle 5.6 sind alle, aus den Rohdaten erfassten Abbiegeverböte eingetragen. Die Untersuchung soll zeigen, wie gut die manuell erstellt und als realitätsnah geltenden Verböte in der NAVTEQ Karte von 2010 durch die anderen Karten nachgestellt werden.

Die OpenStreetMap kann nur 36% der referenzierten Kanten zuordnen. Von den abbildbaren Verböten werden etwa genauso viele gefunden wie nicht gefunden. Die NAVTEQ Karte 2013 kann knapp 50% der Kanten referenzieren. Die Quote der richtig nachvollzogenen Verböte liegt bei 87%.

Die Erfüllung der Verböte in der OpenStreetMap 2013 gelingt auf beiden NAVTEQ Karten gleichermaßen mit 59%

Die Auswertung liefert auf dem Hannover-Netz ähnliche Ergebnisse (keine Tabelle), wobei hier nur die Versionen von NAVTEQ 2013 und OpenStreetMap 2013 verglichen werden können. Die Anzahl der in NAVTEQ vorhandenen Beschränkungen ist mehr als doppelt so hoch (+107%).

öffentl. Straßen		Testkarte			
		NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
Referenzkarte	Verbote	565	455	170	190
NAVTEQ 2010	565		319/42	105/91	130/141
NAVTEQ 2013	455	362/74		172/160	162/158
OSM 2013	171	94/63	87/63		150/13
OSM 2014	190	107/68	98/71	155/34	

Tabelle 5.6: Abbiegerelationen: Eingetragen sind die erlaubten / verbotenen Fahrtrichtungen, denen das Routing folgt. (öffentliche Straßen der Rohdaten, Braunschweig)

Simulationsnetz		Testkarte			
		NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
Referenzkarte	Verbote	248	45	205	227
NAVTEQ 2010	248		98/139	132/86	115/81
NAVTEQ 2013	45	21/19		28/9	28/9
OSM 2014	227	66/89	63/130	178/27	

Tabelle 5.7: Abbiegerelationen: Eingetragen sind die erlaubten / verbotenen Fahrtrichtungen, denen das Routing folgt. (konvertiert zu Simulationsnetz)

Simulationsnetz (keine U-Turns)		Testkarte			
		NAVTEQ 2010	NAVTEQ 2013	OSM 2013	OSM 2014
Referenzkarte	Verbote	14268	10880	13085	13307
NAVTEQ 2010	14268		11920/841	10229/1577	10210/1557
NAVTEQ 2013	10880	9878/479	10867/13	8769/994	8790/992
OSM 2014	13307	8887/1153	9145/1063	12713/294	

Tabelle 5.8: Abbiegerelationen: Eingetragen sind die erlaubten / verbotenen Fahrtrichtungen, denen das Routing folgt. Höhere Anzahl, da U-Turns als verboten gelten (konvertiert zu Simulationsnetz)

Die OpenStreetMap berücksichtigt 28,4%, die NAVTEQ Karte 57,2% der Fahrteinschränkungen des jeweils anderen Netzes.

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Netze in das Simulationsformat konvertiert wurden. Für die Interpretation der Ergebnisse der Routen (vergleiche Kapitel 5.1.4) ist dieses Netz von Interesse.

Das Verhindern von Wendemanövern (U-Turns) an jedem Segmentende (vergleiche Konvertierungsparameter in 4.4) führt zu einer Vielzahl von Verboten. Dadurch werden die Ergebnisse in Tabelle 5.8 unübersichtlich. Es kann dort ausgelesen werden, dass etwa doppelt so viele Abbiegebeziehungen von der OpenStreetMap falsch wiedergegeben werden wie von der NAVTEQ Karte.

Unter Missachtung der U-Turns kehrt sich das Ergebnis etwa in eine gegenteilige Aussage um. In Tabelle 5.7 sind nur Abbiegeverbote ohne die Wendemanöver eingetragen. Im Vergleich zur Vorgabe der NAVTEQ 2010 Karte erlauben die Versionen der OpenStreetMap in 86 (2013) und 81 (2014) Fällen falsche Fahrten. Die unbearbeitete NAVTEQ 2013 Karte erlaubt an 139 Stellen das unberechtigte Abbiegen. Eine etwa doppelt so hohe Fehlerrate gegenüber OpenStreetMap weist auch die NAVTEQ 2010 Karte auf, wenn sie Manöver der NAVTEQ 2013 abbilden soll. Für den Vergleich mit OpenStreetMap als Vorgabe wurde die Version von 2014 ausgewählt, da sie mehr Restriktionen aufweist (227 gegenüber 205 in 2013), die verglichen werden können. Die OpenStreetMap 2013 beachtet die Verbote in dreimal mehr Fällen als die NAVTEQ Karten. Fehler bei der Befolgung finden sich in ihr nur in einem Drittel (zu NAVTEQ 2010), beziehungsweise einem Viertel (zu NAVTEQ 2013) der Fälle.

Zurückzuführen ist dieses Verlieren der Informationen durch den Konvertierungsprozess. Die Angabe der Verbindungs-Spuren aus der NAVTEQ Quelle (GDF Daten Komplexitätsebene 2) wird in der aktuellen Version des Konvertierungsprogramms nicht berücksichtigt. Die vorhandenen Verbote werden ausschließlich aus den Manövern (GDF Ebene 1) bezogen.

Bewertung

Die Rohdaten zeigen deutlich, dass die Restriktionen bei der Routenwahl in NAVTEQ besser und zahlreicher vorhanden sind als in der OpenStreetMap.

Bei der Konvertierung geht diese Überlegenheit verloren. Wenn die Karte als Simulationsnetz verwendet wird, ist die aus OpenStreetMap Daten erstellte Version besser.

5.1.4 Routenverteilung

Die Analyse der Routenwahl wird über eine Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Die Verkehrsnachfrage ist für das Braunschweig 2010 Netz für jeden Wochentag und für verschiedene Fahrzeugklassen (PKW, LKW, Bus) mit einer eindeutigen Start- und Zielposition sowie dem Startzeitpunkt bekannt. Mit dem Matching-Verfahren werden die Ein- und Ausfahrorte und -zeiten auf die weiteren Netze angepasst. Liegt anschließend die Verkehrsnachfrage als Start-Ziel-Beziehung vor, wird ein neues Routing auf dem Kartenmaterial durchgeführt. Die Wahl des Routing-Algorithmus und die getroffenen Nebenbedingungen haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.

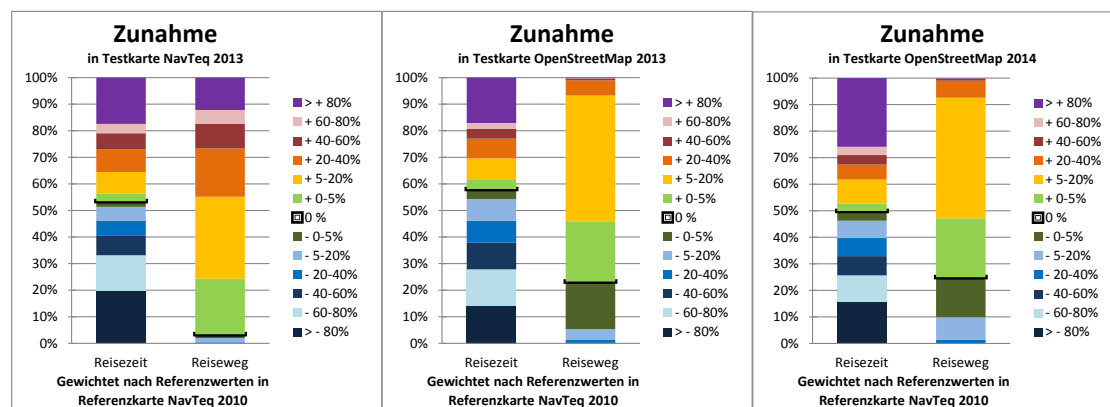
Werden die *kürzesten Routen* bestimmt, so lässt sich aus dem Ergebnis herauslesen, ob die Kar-

ten einen unterschiedlichen Vernetzungsgrad ausweisen.

Unter Verwendung der *schnellsten Routen* hat die Qualität der eingetragenen Geschwindkeitsbeschränkungen einen Einfluss auf das Ergebnis der Reisedauer auch im unausgelasteten Netz (Free-Flow). Wird die Simulation mit vielen Fahrzeugen ausgelastet, so steigt auch der Einfluss der Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen. Wartende Abbieger und Spurwechsel an Fahrbahnverengung erzeugen Stau und stockenden Verkehr, was die Reisezeit ansteigen lässt. Die Route bleibt in ihrer Länge gleich, wenn keine Ausweich-Manöver genutzt werden.

Die Untersuchung auf Netzen mit hoher Verkehrsdichte ermöglicht die Bildung eines Systemoptimums. Bei diesem wird das Netz optimal ausgelastet indem die Kapazitäten der Straßen vom Router berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit für das Verfahren ist die Bestimmung der Fahrzeugroute erst kurz vor dem Einsetzen des Simulationsfahrzeuges in das Netz. Bei dieser Art der Suche wird das aktuelle Verkehrsgeschehen berücksichtigt und eine schnellste Route erstellt, welche überlastete Straßen umgeht. Dies führt zu einer Verlängerung des Reiseweges. Durch die „Stau-Umfahrung“ werden die Ergebnisse weniger Vergleichbar, da je nach Ausprägung der Verkehrsbehinderungen sehr weite Ausweichrouten entstehen können, deren Entsprechung in den untersuchten Netzen unterschiedlich ausfallen. Ein genauer Vergleich einzelner Routen ist unter diesen Umständen nicht mehr möglich.

Zum Einsatz kommt die vom DLR entwickelte Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO (Simulation of Urban MObility). Jeder virtuelle Verkehrsteilnehmer beharrt in dieser auf seiner ursprünglich zugewiesenen Route. Durch das strickte Abfahren können die Simulationsergebnisse einfacher mit den im Vorfeld bestimmten Routen verglichen werden. Die Auswertung der Simulation findet unter identischen Testbedingungen statt. Für alle konvertierten Simulationsnetze werden die gleichen Verkehrsnachfragen produziert und die schnellsten Routen ohne Verkehr bestimmt. In einer Simulation mit der Verkehrsnachfrage für Dienstag/Donnerstag werden Reiseseweg sowie die benötigte Reisezeit ermittelt. Die durchschnittliche Abweichung pro Fahrzeug ist in Tabelle 5.9 eingetragen. Eine detailliertere Übersicht über die Verteilung der Abweichung ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Das Netz NAVTEQ 2010 bildet dabei die Referenzgrundlage. Die durchschnittliche Reisezeit und Weglänge nimmt sowohl bei der konvertierten NAVTEQ Karte als auch bei den OpenStreetMap Daten zu (siehe Tabelle 5.9). Als Grund hierfür ist das Fehlen der U-Turns in den konvertierten Karten zu vermuten. Bei der manuellen Aufbereitung der Referenzkarte NAVTEQ 2010 wurden an einigen Knotenpunkten explizit Verbindungen hinzu-



Verwendung einer Schnellste-Wege-Suche bei freier Fahrt Bedingung

Abbildung 5.2: Zunahme der Reisezeiten im Verhältnis zur Referenzkarte NAVTEQ 2010

	NAVTEQ 2013	OpenStreetMap 2013	OpenStreetMap 2014
Länge	+ 2290 m	+ 378 m	+ 971 m
Zeit	+ 342 s	+ 434 s	+ 77 s

Tabelle 5.9: Zunahme von Reiseweg und Dauer im Durchschnitt gegenüber NAVTEQ 2010

gefügt, welche eine Kehrtwende ermöglichen.

Die Schwankung der Zeit ist bei allen Karten deutlich zu erkennen, da Bereiche mit mehr als 20 % Abweichung den Großteil an der Gesamtmenge ausmachen (siehe Abbildung 5.2). Etwa 5 % der Fahrten haben eine Zeitabweichung von -5 bis +5 % von der Referenzzeit. Alle weiteren Zeiten weichen stärker ab. Diese Variation ist auf die Simulation mit tatsächlichen Verkehrsbedingungen und überlasteten Netzen zurückzuführen.

Die Längenzunahme ist bei OpenStreetMap 2013 im Durchschnitt 83 % geringer als bei NAVTEQ (siehe Tabelle 5.9). Insgesamt sind in allen Karten die Abweichungen nicht so groß wie bei der Reisezeit, sie nehmen jedoch deutlich häufiger zu als verringert zu werden. In NAVTEQ 2013 sind 96% der Routen länger als in der Referenzkarte. Bei OpenStreetMap liegt dieser Anteil nur bei ≈ 77 %. Während dort nur 8 % der Routen eine Längenzunahme von mehr als 20 % erfahren, sind es in der NAVTEQ Karte etwa 45 %.

Eine detailliertere Analyse kann durch die Intervall-Einteilung der Routen nach Referenzlänge erreicht werden. Die Verteilung ermöglicht eine getrennte Bewertung des Netzes auf kurzen und langen Routen.

In beiden Karten verhält sich die Reisezeit gleichermaßen. Auf kurzen Routen ist ein größerer Teil (≈ 60 %) der Verkehrsteilnehmer schneller unterwegs. Für weite Strecken von mehr als 16 km sinkt dieser Anteil unter 20 %. Mehr als 30 % der Routen sind um 80 % länger als in der Referenzkarte.

Bei der Längenverteilung wird eine Divergenz zwischen den Karten deutlich (siehe Abbildung 5.4). In beiden ist mit steigender Referenzlänge ein leichter Anstieg des Anteils der kürzeren Routen zu verzeichnen. In der OpenStreetMap ist die Menge der um >40 % längeren Wege verschwindend gering, während dieser bei NAVTEQ zwar mit zunehmender Referenzlänge abnimmt, jedoch mit einem Anteil von 52 % bei kurzen Routen sehr deutlich ist.

Bewertung

Die Ergebnisse der Untersuchung unter Free-Flow Bedingungen zeigen, dass der Navigationsgraph in der OpenStreetMap insgesamt kürzere Routen erlaubt. Die Vernetzung der Straßen ist in dieser ausgeprägter als in dem aus den NAVTEQ 2013 Daten erstellten Simulationsnetz.

Die Reisezeiten können aufgrund von Einschränkungen in der Simulationssoftware nicht mit Echtzeit-Routing untersucht werden, sondern beziehen sich nur auf die unter Free-Flow erstellten Routen. Die starken Abweichungen in den positiven und negativen Bereich zeigen in beiden Karten die Tendenz zu langen Verkehrsstaus. Eine detaillierte Aussage ist aufgrund der sehr ähnlichen Intervall-Diagramme nicht möglich.

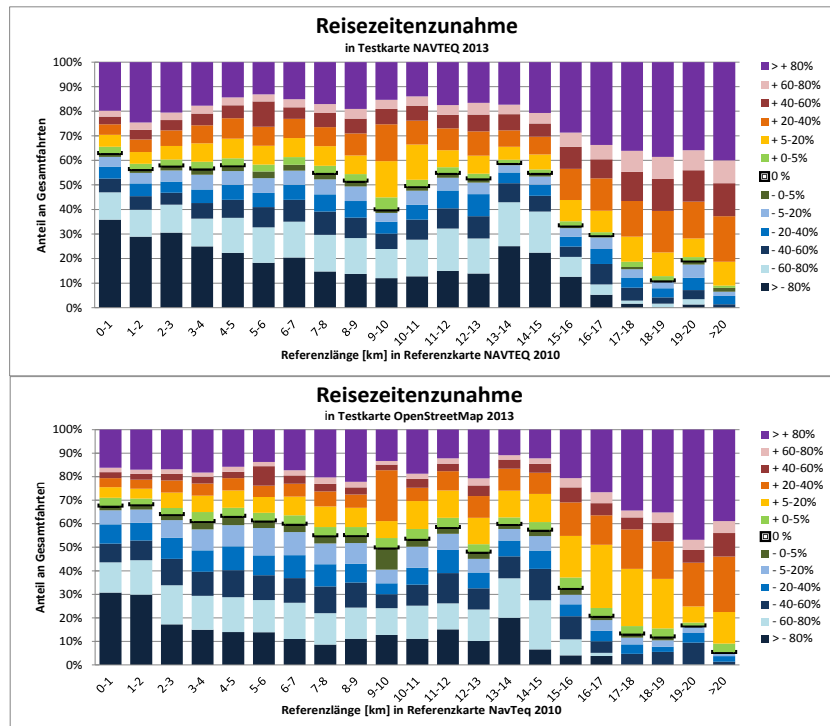


Abbildung 5.3: Zunahme der Reisezeit aufgeschlüsselt nach Referenzlänge

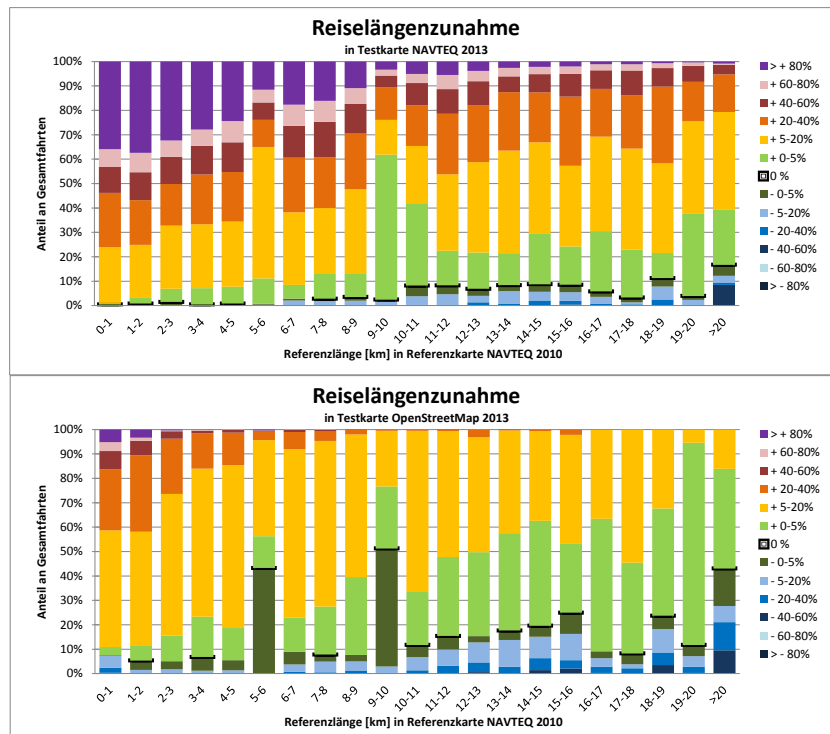


Abbildung 5.4: Zunahme der Weglänge aufgeschlüsselt nach Referenzlänge

Referenz NAVTEQ 2010		NAVTEQ 2013			OpenStreetMap 2013		
Attribut	Deckung	Deckung	Gleich	Konflikt	Deckung	Gleich	Konflikt
Spurzahl	100	100	88	4	22	15	31
Tempolimit	100	100	95	11	66	40	39
Höhe	0,0	0	100	-	0,15	99	0
Breite	0,0	0	100	-	0,44	99	0
Gewicht	0,0	0	100	-	0,81	99	0
Namen (reg.)	24,2	24,0	99	0,3	31,4	86,5	18
Namen (lokal)	88,8	90,0	97,9	0,9	92,4	82	7
Abbieg. Spur	0	1,26			0,93		

Angaben in Prozent [%]

Tabelle 5.10: Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Braunschweig)

Referenz NAVTEQ 2010		NAVTEQ 2013			OpenStreetMap 2013		
Attribut	Deckung	Deckung	Gleich	Konflikt	Deckung	Gleich	Konflikt
Spurzahl	100	100	93	6	100	92	7
Tempolimit	100	100	78	21	100	40	59
Höhe	0,0	0	100	-	0	100	-
Breite	0,0	0	100	-	0	100	-
Namen	0	0	100	-	0	100	-
Abbieg. Spur	100	100			100		

Angaben in Prozent [%]

Tabelle 5.11: Vergleich der Attribute in den konvertierten Daten (Braunschweig)

5.1.5 Straßenattribute

Ein Vergleich zwischen den Attributen in den öffentlichen Straßen und in den konvertierten Daten zeigt die Auswirkungen der Kartenbearbeitung mit NetConvert. In beiden Fällen wird ausschließlich die NAVTEQ 2010 Karte Braunschweig als Referenz angesetzt. Für eine bessere Übersicht werden nur die Karten von NAVTEQ und OpenStreetMap des Jahres 2013 verglichen. Dabei werden in der OpenStreetMap nur solche Wege untersucht, die öffentlichen Straßen entsprechen. Fußwege, Radwege, Forstwege oder ähnliche sind ausgeschlossen, da bereits bekannt ist, dass sie die zu prüfenden Informationen nicht besitzen.

Der Tabellenaufbau in Tabell 5.10 und der entsprechenden Tabellen der anderen Regionen orientiert sich an den Bezeichnungen der Zwischenschritte aus Kapitel 3.5. Aufgrund des geringen zur Verfügung stehenden Raums wurden die Spaltenbezeichnungen verkürzt. *Deckung* bezeichnet die Eigenabdeckung nach Formel 3.19. *Gleich* steht für die Gleichheit nach Formel 3.21. Der *Konflikt* wird nach Formel 3.24, der *Score* nach Formel 3.23 berechnet.

In den Rohdaten (siehe Tabelle 5.10) zeigt sich, dass von NAVTEQ nur die Attribute Spuranzahl, Geschwindigkeitsbegrenzung (Tempolimit) und Namen angegeben werden. Informationen zu zulässiger Höhe, Breite oder Gewicht eines Fahrzeuges fehlen. Als Grund kann vermutet werden, dass es sich bei dem zur Verfügung gestellten Material nur um Daten für PKW Navigation handelt, in denen besondere Einschränkungen keine bedeutende Rolle haben. Grundsätzlich ermöglicht das GDF Format die Zuweisung dieser Attribute.

Der Grad der Eigenabdeckung ist bei OpenStreetMap nicht so weit ausgeprägt. Eine deutliche Anzahl an fehlenden Einträgen gibt es bei Spuranzahl (22 % vorhanden) und Höchstgeschwindigkeit (66 % vorhanden). In Abbildung 5.5 sind die Orte mit Konflikten zwischen OpenStreetMap und NAVTEQ (beides 2013) dargestellt. Bei der Spuranzahl ist zu beachten, dass diese nur explizit angegeben ist, wenn eine Abweichung vom Normalfall (Autobahnen 2 Spuren, alles weitere 1 Fahrspur je Richtung) besteht, ist sie nicht eingetragen, wird der fehlende Wert nicht als Konflikt gezählt.

Die Angabe über die Eigenabdeckung der Abbiegerspuren umfasst bei der OpenStreetMap die Anzahl der Wege mit dem „turn:lanes“-Tag (siehe Kapitel 4.2.5). Ein qualitativer Vergleich ist aufgrund fehlender Konvertierungsmöglichkeiten nicht möglich.

Bei der Konvertierung werden alle Informationen über Spuranzahl und Geschwindigkeit gesetzt (siehe Tabelle 5.11). Die angenommenen Werte der Spuranzahl erhöhen die Übereinstimmung deutlich, da zuvor als fehlend eingestufte Angaben nun mit einer Spur angenommen werden. Die Übereinstimmung steigt von 15 auf 92 %.

Mit der Annahme der Geschwindigkeiten wird nur eine Annäherung an die Referenzwerte von 40% erreicht. Das ist etwa halb so gut, wie bei der NAVTEQ 2013 Karte (78 %).

Namen, Höhe und weitere Maße werden für die Simulation nicht benötigt. Daher sind sie entfernt worden und können nicht verglichen werden.

Bewertung

Die in der OpenStreetMap für die Simulation grundlegend benötigten Daten sind bisher nur unzureichend vorhanden. Eine Konvertierung mit den in Kapitel 4.4 genannten Annahmen ermöglicht die Erzeugung eines brauchbaren Simulationsnetzes.

Dort, wo Daten in OpenStreetMap vorhanden sind, stimmen diese grundsätzlich mit der Real-



Abbildung 5.5: Abweichende Attribute (Braunschweig)

tät überein. Dies kann mit der noch jungen Entwicklung erklärt werden, da Objekte neu erstellt werden und dabei Wert auf die Genauigkeit gelegt wird. Ob die Attribute nach einer Änderung ebenfalls gut gepflegt werden, sollte in Zukunft untersucht werden.

5.2 Vergleich in der Region Hannover

Die Region Hannover hat eine maximale Nord-Süd Ausdehnung von 63 km und in West-Ost von 69 km (siehe auch Abbildung 5.1).

Für diese Region wird nur die aktuellste NAVTEQ (2013) und die aktuellste OpenStreetMap (2014) verglichen.

5.2.1 Straßennetzlänge

Die Gesamtstraßennetzlänge liegt in der OpenStreetMap (2013) um knapp 62 % über der der NAVTEQ Karte (siehe Tabelle 5.12). Unter Betrachtung der öffentlichen Straßen steigt der Zusatzanteil auf 72 %.

Die gemeinsam genutzte Straßenmenge entspricht 16.293 km. 431 km sind nur in der NAVTEQ Karte enthalten. Diese Zahl wird von der OpenStreetMap mit 11.424 km um das 25 fache überstiegen. Dies bezieht sich jedoch auch alle enthaltenen Kanten, zu denen nicht nur die öffentlichen Straßen gehören.

Braunschweig	Weglänge in Kilometer	
	NAVTEQ 2013	OSM 2014
Gesamtlänge	17.647	28.567
öffentlich	17.637	26.331
privat	10	2.235
öffentl. PKW geeignet	12.847	22.168
Fahrradfahrer geeignet	11.950	23.825
Fußgänger geeignet	17.070	24.674

Tabelle 5.12: Weglängen Hannover (Rohdaten der Straßennetze)

Sind nur öffentliche Straßen enthalten, beträgt die gemeinsame Straßenlänge 11.244 km. Die NAVTEQ Karte enthält zusätzlich 300 km Straßen, die OpenStreetMap besitzt 10.264 km exklusives Straßenmaterial (33 fache Menge).

Nach Formel 3.14 ergibt sich der Überhangsquotient der OpenStreetMap Karte zu 0,913. Die NAVTEQ Karte erreicht einen Wert von 0,027.

Bewertung

Die OpenStreetMap hat eine wesentlich größere Menge verzeichneter Straßen. Sowohl in der Gesamtlänge als auch in der Überlagerung besitzt sie mehr Informationen

5.2.2 Abbiegerelationen

öffentl. Straßen		Testkarte Hannover	
		NAVTEQ 2013	OSM 2014
Referenzkarte	Verbote	1928	877
NAVTEQ 2013	1928		544/635
OSM 2014	877	399/356	

Tabelle 5.13: Abbiegerelationen: Eingetragen sind die erlaubten / verbotenen Fahrtrichtungen, denen das Routing folgt. (öffentliche Straßen, Region Hannover)

In Tabelle 5.13 sind die Ergebnisse der Analyse der Abbiegerelationen aufgeführt. Die NAVTEQ Karte besitzt mehr als doppelt so viele Abbiegeverbote wie die OpenStreetMap (1928 zu 877). Von diesen 1928 kann die OpenStreetMap 28 % nachbilden, weitere 33 % werden nicht befolgt. Für die verbleibenden 49% konnten in den Karten keine entsprechenden Kanten ermittelt werden, sodass hier keine Aussage möglich ist.

Von den 877 Verboten der OpenStreetMap kann die NAVTEQ Karte 45 % nachbilden und nur

41% werden missachtet. Die Nachbildung der Relationen kann in 14 % der Fälle nicht geschehen.

Bewertung

Die OpenStreetMap besitzt eine nur knapp halb so große Sammlung an expliziten Abbiegeverböten wie die NAVTEQ Karte. Die Auswertung zeigt, dass die Nachbildung der Relationen in der OpenStreetMap nicht durch topologische Maßnahmen erreicht werden. Die Informationen sind noch nicht vorhanden.

Die NAVTEQ Karte kann mehr Verböte nachbilden. Bei der größeren Anzahl an vorhandenen Informationen ist es verwunderlich, dass trotzdem mindestens 42 % nicht richtig beachtet werden. Grundsätzlich hat die NAVTEQ Karte einen besseren Informationsgehalt als auch ein besseres Abbildungsverhalten.

5.2.3 Einbahnstraßen

Straßen, die nur in einer Richtung befahren werden dürfen, sind in den Abbiegeverböten nicht erfasst. Das für einen Kraftfahrzeugfahrer sichtbare Verbotsszeichen wird im Navigationsgraphen dadurch modelliert, dass nur eine Kante in der befahrbaren Richtung vorhanden ist. Eine Fehleranalyse für Einbahnstraßen muss daher eigenständig erfolgen.

Für einen Abgleich der Einbahnstraßen werden die Karten der Stadt Hannover aus dem Juni 2013 von NAVTEQ und OpenStreetMap genutzt, um den gleichen Erfassungszeitpunkt der Daten zu berücksichtigen.

Für die Klärung von Konflikten zwischen den Netzen werden Luftbildaufnahmen von 2014 und eigene Ortskenntnisse genutzt. Das Gebiet umfasst die Innenstadt Hannover in der Ausdehnung $4,5 \times 4,5$ km mit dem Stadtmittelpunkt Kröpcke als Zentrum. In diesem Gebiet werden 40 Fälle von Widersprüchen gezählt. 36 von diesen entstehen durch die Angabe nur einer Karte, dass es sich um eine Einbahnstraße handelt, während in der anderen Hin- und Rückrichtung angegeben sind. An vier Straßen geben beide Netze Richtungen vor, die sich entgegenstehen.

Nach der Prüfung der Konflikte handelt es sich in der OpenStreetMap in 30 Fällen um richtige Angaben. Ebenso stimmen bei den Gegensätzen 75 % der Angaben in der OpenStreetMap mit der Realität überein.

Bewertung

Einbahnstraßen sind ein wichtiger Schlüssel in der Vernetzung des Straßennetzes. OpenStreetMap liefert im Innenstadtbereich Hannover vertrauenswürdige Informationen. Diese Bewertung umfasst lediglich eine sehr kleine Stichprobenmenge und kann in anderen Regionen abweichen.

5.2.4 Straßenattribute

In der NAVTEQ Karte sind Informationen zu Fahrspuranzahl und Höchstgeschwindigkeit flächendeckend vorhanden, während in der OpenStreetMap Geschwindigkeiten nur zu gut 53 % und die Anzahl der Spuren zu knapp 21 % angegeben sind. Namen von Straßen sind in beiden

Referenz NAVTEQ 2013		OpenStreetMap 2014			Hannover
Attribut	Deckung	Deckung	Gleich	Konflikt	Score für OSM
Spurzahl	100	20,7	18,4	9	0,19
Tempolimit	100	53,7	35,2	23	0,43
Höhe	0,0	0,14	99,9	0	0,28
Breite	0,0	0,20	99,8	0	0,39
Gewicht	0,0	0,45	99,6	0	0,90
Namen regional	49,9	49,7	95,3	2,7	0,65
Namen lokal	78,7	76,4	75,0	11	0,75
Abbieg. Spur	1,3	0,03			

Angaben in Prozent [%] (bis auf Score)

Tabelle 5.14: Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Hannover)

Karten sehr ähnlich ausgeprägt. Regionale Namen besitzen in beiden Karten knapp 50 % der Straßen. Die Übereinstimmung zwischen den Quellen beträgt 95 %. Bei lokalen Namen ist die NAVTEQ um 2 Prozentpunkte besser (78,7 %) als die OpenStreetMap (76,4 %). Die gefundenen Namen sind zu 75 % gleich.

Beschränkende Maße sind in der NAVTEQ Karte nicht enthalten. In der OpenStreetMap besitzen einige Straßen Angaben zur maximalen Höhe (0,14 %), Breite (0,2 %) und Gewicht (0,45 %).

Informationen zu Abbiegespuren sind in 1,3 % der NAVTEQ und in 0,03 % der OpenStreetMap Straßen enthalten.

Vertrauenswürdigkeit

Eine Bewertung der Konflikte, die bezüglich der Spuranzahl in OpenStreetMap auftreten, wurde wie im Falle der Einbahnstraßen durchgeführt. In 73 % der 22 Fälle waren die Angaben in der OpenStreetMap zutreffend. In 27 % waren die NAVTEQ Daten näher an den realen Gegebenheiten.

Im gleichen Netz wurde ebenfalls für die Höchstgeschwindigkeit eine Konfliktbewertung durchgeführt. Das Ergebnis ist ähnlich zur Qualität der Einbahnstraßen und Spuranzahl. Die OpenStreetMap besitzt in 77 % der Konfliktfälle eine Übereinstimmung mit den Realitätswerten. Entsprechend erreichen die NAVTEQ Daten nur einen Wert von 23 %.

Bewertung

Die Straßenattribute sind in der OpenStreetMap nicht so flächendeckend vorliegend wie in der NAVTEQ Karte. Der Anteil der in einem Konflikt stehenden Informationen ist hoch. Dort wo ein Konflikt auftritt ist nach der Untersuchung einiger innerstädtischen Bereiche die OpenStreetMap zu einem größeren Teil (≈ 75 % bei allen untersuchten Attributen) vertrauenswürdiger als die NAVTEQ Karte.

5.3 Vergleich im Gebiet Darmstadt

Für die Stadt Darmstadt werden die NAVTEQ Karte von 2013 und ein OpenStreetMap Auszug von September 2014 verglichen. Die Region wurde ausgewählt, da ihre Abmessung etwa dem Gebiet Braunschweig entspricht, die zwei Regionen jedoch einen weiten Abstand haben. In dieser Untersuchung wird verstärkt auf den regionalen Unterschied zwischen den Auszügen aus der OpenStreetMap eingegangen.

5.3.1 Straßennetzlänge

In der OpenStreetMap sind die Bürgersteige entlang den Hauptstraßen als eigene Wege eingetragen. Dieser Umstand und die großen Innenstadtbereiche, in denen Fußgängerzonen vorherrschen oder nur öffentlicher Nahverkehr zugelassen ist, bewirkt, dass die Straßengesamtlänge um 72 % größer ist als bei NAVTEQ (siehe Tabelle 5.15).

Reduziert auf die öffentlichen Straßen ergibt sich in der OpenStreetMap eine um +33 % höherer Straßenlänge als bei NAVTEQ 2013.

Darmstadt	Weglänge in Kilometer	
	NAVTEQ 2013	OSM 2014
Gesamtlänge	1.787	3.281
öffentlich	1.782	3.066
privat	5	214
PKW geeignet	909	1.214
Fahrradfahrer geeignet	460	2.691
Fußgänger geeignet	1.676	2.975

Tabelle 5.15: Weglängen Darmstadt (Rohdaten der Straßennetze)

5.3.2 Netzabdeckung

Die große Anzahl an Bürgersteigen, die parallel zu den Straßen verläuft erschwert das Überlagern der Kanten und die manuelle Überprüfung der Ergebnisse. Daher findet eine Vorfilterung statt, sodass nur öffentliche Straßen in den Netzen vorliegen.

Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethode beim Gewichten der Längen haben die Gesamtlängen einen anderen Wert als in Tabelle 5.15).

Beide Karten decken etwa einen gleichgroßen Anteil (etwa 87 %) der jeweils anderen Karte ab (siehe Tabelle (5.16).

Referenz		Testkarte	
Karte	Länge	NAVTEQ 2013	OSM 2014
NAVTEQ 2013	915		(87,3%) 799
OSM 2014	906	(86,9%) 788	

Tabelle 5.16: Netzüberlagerung Darmstadt, Rohdaten

5.3.3 Abbiegerelationen

öffentl. Straßen		Testkarte Darmstadt	
		NAVTEQ 2013	OSM 2014
Referenzkarte	Verbote	382	333
NAVTEQ 2013	382		144/140
OSM 2014	333	127/109	

Tabelle 5.17: Abbiegerelationen: Eingetragen sind die erlaubten / verbotenen Fahrtrichtungen, denen das Routing folgt. (öffentliche Straßen, Darmstadt)

Die Anzahl der Abbiegerelationen der NAVTEQ Karte nicht so deutlich höher (lediglich +15 %) wie im Verhältnis der zuvor untersuchten Regionen. Beide Karten bilden die Verbote der jeweils anderen häufiger ab, als dass sie ein Verbot missachten. Die NAVTEQ Karte erreicht eine Erfolgsrate von 38 %. Es gehen 33 % der Verbote unberücksichtigt in die Routenberechnung ein und 29 % sind unbekannt. Die OpenStreetMap bildet 38 % richtig ab, missachtet 37 % und kann 25 % nicht untersuchen.

5.3.4 Straßenattribute

In der OpenStreetMap sind lediglich 22 % der Straßen mit einer Spuranzahl, 71 % mit Höchstgeschwindigkeit, 49 % mit regionalen Namen und knapp 86 % mit Straßennamen versehen (siehe Tabelle 5.18). Diese Werte entsprechen dem Vergleich in Braunschweig für den Abdeckungsanteil in der OpenStreetMap. Die Übereinstimmung mit den NAVTEQ Daten ist in Darmstadt höher. Hier ist jedoch eine andere Kartenversion (2013) im Einsatz.

Bewertung

Trotz des großen räumlichen Abstandes zur Region Braunschweig weisen die Untersuchungen zwischen dort und Darmstadt wesentliche Gemeinsamkeiten auf. Die höhere Anzahl an Wegen, die jedoch sehr viel geringere an öffentlichen Straßen weist darauf hin, dass die extreme Detailtreue in der OpenStreetMap viele Gebiete umfasst und kein Einzelphänomen der Stadt Braunschweig oder Hannover ist.

Referenz NAVTEQ 2013		OpenStreetMap 2014			Darmstadt
Attribut	Deckung	Deckung	Gleich	Konflikt	Score für OSM
Spurzahl	100	22	20	9	0,21
Tempolimit	100	71	55	23	0,62
Höhe	0,0	0,11	0	0	0
Breite	0,0	0,92	0	0	0
Gewicht	0,0	0,07	0	0	0
Namen regional	48,8	49	94	3	0,64
Namen lokal	96	85,8	85,6	4	0,85

Angaben in Prozent [%] (bis auf Score)

Tabelle 5.18: Vergleich der Attribute in den Rohdaten (öffentliche Straßen, Darmstadt)

6 Bewertung

6.1 Verwendung der Bewertungskriterien

Die vorgestellten Bewertungsmethoden können auf beliebige digitale Straßenkarten übertragen werden. Die Bewertung der Netzgeometrie liefern einen guten Überblick über die Vollständigkeit der Datengrundlage.

Das eingeführte Vorgehen zum Erkennen von Abbiegeverböten auf der strategischen Ebene unter Nutzung eines einfachen Routingalgorithmus ist eine neue Methode. Die Umsetzung der Erkennung anhand verschiedener Abstände bedarf einer weiteren Untersuchung und Kalibrierung, um noch bessere Ergebnisse zu liefern.

Die Erstellung eines Scores für jedes Straßenattribut ist eine einfache und wirkungsvolle Methode zur Einordnung der Qualität. Für ein besseres Verständnis sind die zuvor berechneten Werte der Abdeckung und Gleichheit jedoch vorzuziehen.

Mit zunehmender Spezialisierung des geplanten Einsatzgebietes lassen sich die zu prüfenden Attribute einzeln untersuchen und nach eigenem Ermessen gewichten. Die qualitative und quantitative Auswertung lassen schnell und deutlich den Informationsgehalt und den zu erwartenden Aufwand für die Nachpflege der Daten abschätzen.

Für eine Berichtigung der aufgetretenen Konflikte ist immer eine manuelle Überprüfung erforderlich, da bisher keine vertrauenswürdige Kartengrundlage bestimmt werden konnte.

6.2 Verwendung des Matching-Algorithmus

Das Finden von sich überlagernden Kanten ist ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung. Mit dem OpenLR Verfahren ist keine zufriedenstellende Erfassung möglich, da die genutzten Parameter nicht aussagekräftig genug sind.

Der entwickelte Matching-Algorithmus ist nur für das Erkennen relativ kurzer Straßenabschnitte geeignet. Da es sich um einen *inkrementellen* Algorithmus handelt, bricht die Suche bei einer falschen Zuordnung ab. Über eine verbesserte Suchmethode könnte der Algorithmus auch lange Routen verfolgen. Denkbar ist dabei die Suche in einem Graph, welcher die Kantengewichte entsprechend der Bewertungsergebnisse enthält.

6.3 Auswahl einer Kartengrundlage

OpenStreetMap enthält eine Vielzahl von Informationen, die in den zur Verfügung gestellten NAVTEQ Daten nicht enthalten sind. In den untersuchten Regionen ist die Anzahl der Straßen und Wege in der OpenStreetMap immer größer.

Für die über einfache PKW Navigation hinausgehenden Aufgaben ist die OpenStreetMap mit sinnvollen Erweiterungen ausgestattet. Diese sind nicht vollständig, müssen geprüft und erweitert werden. Wenn sie explizit vorliegen, ist ihre Vertrauenswürdigkeit höher als die der NAV-

TEQ Informationen.

Die Korrektur von Daten ist in beiden digitalen Straßenkarten angebracht. Aus der offenen Lizenz ergibt sich ein nutzbarer Mehrwert, wenn die OpenStreetMap genutzt wird, da die Grunddaten verändert und weitergegeben werden dürfen.

Die Informationen der NAVTEQ Karte dürfen mit der aktuellen Lizenz nicht verändert und weitergegeben werden. Für die Bereitstellung als Grundlage für das EmerT Webportal kann sie daher nicht verwendet werden.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Bewertungsgrundlagen helfen bei der Auswahl der am besten geeigneten Karte, wenn aus einer größeren Anzahl von digitalen Straßenkarten gewählt werden kann. Das Spektrum der Analyse reicht von der Vollständigkeit der gesamten Karte über die Vernetzung bis hinunter zur Attributqualität einzelner Wege. Damit ist es möglich spezielle Aussagen für den Einsatzbereich Navigation oder Verkehrsflusssimulation zu erhalten. Der Bereich der Abbiegerspuren, der sowohl für eine Navigation mit Fahrspurassistentz als auch für die Simulation wichtig ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend untersucht werden. Hier wäre die Entwicklung eines eigenständigen Verfahrens denkbar.

Im praktischen Vergleich stellt sich heraus, dass die freie OpenStreetMap mehr Wege und Straßen verzeichnet als die NAVTEQ Karte. Die für eine Navigation grundlegenden Informationen über Geschwindigkeit und Abbiegevorschriften sind in den kommerziellen Daten im größeren Umfang vorhanden. Die OpenStreetMap ist jedoch ein noch stark wachsendes Projekt, das erst seit kurzer Zeit den Datenbestand für Navigationsanwendungen aufbereitet. Eine Wiederholung des Vergleichs nach einiger Zeit sollte durchgeführt werden, um den Entwicklungsfortschritt der OpenStreetMap in unterschiedlichen Qualitätsbereichen zu erfassen.

Literatur

- [1] ISO 14825:2011 Intelligent transport systems – Geographic Data Files (GDF) – GDF5.0. 2011
- [2] Kapitel Fréchet Distance for Curves, Revisited. In: BORIS ARONOV, Sarel Har-Peled Christian Knauer Yusu Wang Carola W. Sarel Har-Peled: Algorithms – ESA 2006. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 52–63
- [3] CONTRIBUTORS, OpenStreetMap: OpenFireMap Mapportal. ©Data CC-BY-SA by OpenStreetMap.org [14.10.2014]. <http://openfiremap.org/>
- [4] CORNEIL, D. G. ; GOTLIEB, C. C.: An Efficient Algorithm for Graph Isomorphism. In: J. ACM 17 (1970), Januar, Nr. 1, 51–64. <http://dx.doi.org/10.1145/321556.321562>. – DOI 10.1145/321556.321562. – ISSN 0004–5411
- [5] CORPORATION, Nokia: Nokia company history. [19.05.2014]. <http://company.nokia.com/en/about-us/our-company/our-story>. Version: 2014
- [6] CREATIVE COMMONS CORPORATION: Creative commons legal code 2.0. [19.05.2014]. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode>
- [7] EHRIG, Hartmut ; MAHR, Bernd ; CORNELIUS, F. ; GROSSE-RHODE, Martin ; ZEITZ, P.: Mathematisch-strukturelle Grundlagen der Informatik: mit ... 71 Tabellen. Springer Berlin Heidelberg, 2001 (Springer-Lehrbuch). <http://books.google.de/books?id=1RxJ1PCHtZsC>. – ISBN 9783540419235
- [8] GOUTTE, Cyril ; GAUSSIER, Eric: A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-score, with Implication for Evaluation. 6, chemin de Maupertuis F-38240 Meylan, France: Xerox Research Centre Europe, 2005
- [9] HAKLAY, Mordechai: How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. In: Environment and planning. B, Planning & design 37 (2010), Nr. 4, S. 682
- [10] HANGOUET, J.F.: Computation of the Hausdorff distance between plane vector polylines, COGIT Laboratory, Institut Geographique National, avenue Pasteur 2, F-94160 Saint-Mande, France, Diss., 1995
- [11] IEEE COMPUTER SOCIETY: IEEE Standard for a Software Quality Metrics Methodology / IEEE-SA Standards Board, American National Standards Institute. 2009. – IEEE Std 1061™-1998 (R2009)
- [12] JAGADEESH, G.R. ; SRIKANTHAN, T. ; QUEK, K. H.: Heuristic techniques for accelerating hierarchical routing on road networks. In: Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 3 (2002), Dec, Nr. 4, 301-309. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2002.806806>. – DOI 10.1109/TITS.2002.806806. – ISSN 1524–9050

- [13] LANDESAMT GEOINFORMATION BREMEN: GPS-Referenzpunkt Bremen. [14.08.2014]. <http://www.geo.bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen04.c.11088.de>. Version: 2014
- [14] LUDWIG, Ina ; VOSS, Angi ; KRAUSE-TRAUDES, Maïke: Ein Vergleich der Straßennetze von OpenStreetMap und NAVTEQ. In: Angewandte Geoinformatik 2010 (2010)
- [15] MAHMUDA AHMED, Dieter Pfoser Carola W. Sophia Karagiorgou K. Sophia Karagiorgou: A Comparison and Evaluation of Map Construction Algorithms. Feb. 2014
- [16] MITWIRKENDE, OpenStreetMap: OpenStreetMap Portal. ©OpenStreetMap Mitwirkende unter CC BY-SA Lizenz [02.09.2014]. <http://www.openstreetmap.org>
- [17] OORT, P.A.J. van: Spatial data quality: from description to application. Wageningen, Wageningen Universiteit, PhD Thesis, 2006. <http://edepot.wur.nl/38987>
- [18] OPEN DATA COMMONS: Open Database License (ODbL) v1.0. [19.05.2014]. <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/>. Version: 2009
- [19] OPENSTREETMAP-WIKI: Wikimedia Icons. http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Category:Element_icon [13.10.2014],
- [20] SCHARF, Ludmila: Computing the Hausdorff distance between sets of curves, Freie Universität Berlin, Diplomarbeit, 2003
- [21] Kapitel Empirische Vergleichsmaße für die Evaluation von Segmentierungsergebnissen. In: TOBIAS HEIMANN, et a.: Bildverarbeitung für die Medizin 2004. Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 165–169
- [22] VERKEHRSWESEN (FGSV), Forschungsgesellschaft für Straßen- und: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, Grundlagen und Anwendung. FGSV-Verlag, Köln 2006
- [23] ZIPF, Alexander: OpenMapSuOpen, Universität Heidelberg, Germany., <http://openmapsurfer.uni-hd.de> [12.09.2014], ©Kartenmaterial von Beteiligten unter CC BY-SA v 2.0 openstreetmap.org. <http://www.openmapsurfer.uni-hd.de/contact.html>